



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανελαστική συμπεριφορά ενισχυμένων
ελασμάτων σε εγκάρσια φόρτιση**

**Πουλιοπούλου Ελισσάβετ
CV13470**

Επιβλέπων καθηγητής: Κ. Σπηλιόπουλος

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

ΑΘΗΝΑ, [Οκτώβριος/2019]

Η παρούσα διπλωματική εργασία
εκπονήθηκε στα πλαίσια
συνεργασίας με τη σχολή Ναυπηγών Μηχανικών



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Pouliopoulou Elissavet,
2019

Ευχαριστίες

Με τη περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το κλείσιμο ενός μεγάλου κύκλου στη ζωή μου θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι έπαιξαν καθοριστικό ρόλο με τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αλλά και που με στήριξαν και με διαμόρφωσαν στη πορεία όλων αυτών των χρόνων.

Προ πάντων θα ήθελα να ευχαριστήσω το επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σπηλιόπουλο Κωνσταντίνο, που μου ανέθεσε αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα και που με την συνεχή του ενασχόληση και τις εύστοχες και πολύτιμες παρατηρήσεις με βοήθησε να ξεπεράσω προβλήματα αλλά και να εμβαθύνω σε θεωρητικά ζητήματα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Μανώλη Σαμουηλίδη, καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π που σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή μου συνέβαλε κι αυτός ουσιαστικά στην εκπόνηση της εργασίας με τη καθοδήγηση του και τις χρήσιμες συμβουλές που μας βοήθησαν στην κατανόηση του φυσικού προβλήματος.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους που πορευτήκαμε μαζί σε αυτό το δρόμο των φοιτητικών χρόνων και που παρά τις όσες δυσκολίες κι αν προέκυψαν μοιραστήκαμε πολλές ωραίες στιγμές.. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αλέξανδρο Γαλάτη για την στήριξη, την ανοχή και την έμπνευση καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες μου όλους του συντρόφους και τις συντρόφισσες από τον Εγκέλαδο Πολιτικών Μηχανικών. Τους ευχαριστώ για τους αγώνες που δώσαμε μαζί, για το ότι με διαμόρφωσαν σαν άνθρωπο μέσα από τη συλλογική μας δράση και εύχομαι να μείνουν για πάντα πιστοί στις ιδέες τους και στον αγώνα για μια καλύτερη κοινωνία.

Τέλος νιώθω την ανάγκη να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την στήριξη σε όλα τα επίπεδα καθώς όλα αυτά τα χρόνια εργάσθηκαν σκληρά ώστε να μπορέσω να σπουδάσω, παραμελώντας πολλές φορές δικές τους ανάγκες. Αλλά ευχαριστώ θερμά και την αδερφή μου η οποία στάθηκε δίπλα μου σε ότι κι αν τη χρειάστηκα.

Πουλιοπούλου Ελισσάβετ,

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ABSTRACT

Plated structures are very important for a wide variety of applications in the sea and the land, including ships, offshore platforms, bridge beams and overhead cranes.

Throughout their life, the structures made of these components are subject to various types of actions, which are usually normal, though sometimes random.

Perhaps, one of the most complex behaviors of the structures that engineers are called upon to study and deal with is the one caused by the recycled loading, namely, a loading whose intensity fluctuates over many cycles. Typical examples are the seismic action, wind movement, traffic volume, temperature variations and also ripples.

It is, thus, clear that it is a type of loading which is of considerable concern to many areas of engineering, and every scientist, in their own field, is called upon to deal with this phenomenon using the best possible approach, which in many cases does not essentially differ in terms of the analysis.

In the present study, the structure being studied is a metal plate reinforced in the transverse direction; a basic structure of a ship. Such a choice was made for the aim of combining two disciplines, that of Civil Engineering and Naval Engineering. The first field dominates the use of the methods of analyses required, while the latter masters the in-depth knowledge of the nature of the problem.

The aim of this paper is to study the response of parts of the ship's structure, mainly under recyclable loading and also the comparison of the results with the monotonic one, as well as the testing of the simulation capacity of the program used (ABAQUS).

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταλλικές κατασκευές είναι σημαντικές σε μια ποικιλία εφαρμογών που εδράζονται στη θάλασσα αλλά και στη γη συμπεριλαμβανομένων των πλοίων, υπεράκτιων πλατφορμών, γεφυρών δοκών και γερανογέφυρες.

Κατά τη διάρκεια της ζωής τους, οι κατασκευές που κατασκευάστηκαν με αυτά τα μέλη υπόκεινται σε διάφορους τύπους δράσεων, οι οποίες είναι συνήθως φυσιολογικές, αλλά μερικές φορές ακόμη και τυχαίες.

Μια από τις ίσως πιο περίπλοκες συμπεριφορές των κατασκευών που καλούνται οι μηχανικοί να μελετήσουν και αντιμετωπίσουν είναι αυτή που προκαλείται από την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, δηλαδή μια φόρτιση της οποίας η ένταση αυξομειώνεται στη διάρκεια πολλών κύκλων. Παραδείγματα τέτοιας φόρτισης είναι η σεισμική δράση, η δράση του ανέμου, ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι θερμοκρασιακές μεταβολές αλλά και κυματισμοί. Είναι λοιπόν σαφές ότι είναι ένα είδος φόρτισης το οποίο απασχολεί πολλούς τομείς των μηχανικών και ο καθένας στο κλάδο του καλείται να αντιμετωπίσει το φαινόμενο αυτό με τη δυνατόν καλύτερη προσέγγιση, που μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις δεν διαφέρει στη μέθοδο ανάλυσης.

Στη παρούσα εργασία ο φορέας που μελετάται είναι μια μεταλλική ενισχυμένη πλάκα. Μια στοιχειώδη δομή ενός πλοίου. Η επιλογή του συγκεκριμένου φορέα έγινε με σκοπό τη σύνθεση δύο πεδίων (αυτό του Πολιτικού μηχανικού και του Ναυπηγού) από τα οποία "εκμεταλλευόμαστε" στη πρώτη περίπτωση την ευχέρεια στη χρήση των μεθόδων ανάλυσης και στην άλλη την άριστη γνώση του φυσικού προβλήματος.

Σκοπός της παρούσας μελέτης αποτελεί η μελέτη της απόκρισης τμημάτων της κατασκευής του πλοίου κυρίως υπό την ανακυκλιζόμενη φόρτιση αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής με την μονοτονική καθώς επίσης και ο έλεγχος της προσομοιωτικής ικανότητας του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε (ABAQUS).

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η γενικότερη θεωρία των ανελαστικών αναλύσεων καθώς και θεωρητικά στοιχεία που αφορούν στη χρήση προγράμματος (ABAQUS), τόσο όσον αφορά τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και τις μεθόδους μη γραμμικής επίλυσης καθώς και τη μέθοδο εύρεσης λύσης για περιπτώσεις ασταθούς ισορροπίας, με βάση τη μέθοδο RIKS.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το κύριο μέρος της εργασίας το οποίο αποτελείται από το κεφάλαιο των προσεγγιστικών λύσεων για ένα μη ενισχυμένο έλασμα έτσι ώστε να γίνει

σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αναλυτικές σχέσεις έναντι αυτών του προγράμματος με σκοπό τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Έπειτα στο κεφάλαιο των αναλύσεων, παρουσιάζονται στη σειρά αναλύσεις υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση για δύο περιπτώσεις πίεσης. Η μια αφορά ομοιόμορφη κατανομή σε όλη την επιφάνεια του ελάσματος και η άλλη ένα φορτίο πάγου το οποίο εκτείνεται σε μια περιορισμένη έκταση αυτού.

Στο τέλος της εργασίας αναπτύσσονται τα συμπεράσματα. Μετά τις βιβλιογραφικές αναφορές επισυνάπτεται παράρτημα χρήσης του προγράμματος ABAQUS.

Περιεχόμενα

ABSTRACT.....	5
ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
1.1 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ	11
1.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	15
1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	18
1.4 ΜΠΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	19
1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	24
1.6 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ RIKS.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	33
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ.....	33
2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	34
2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΔΙΧΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	39
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ	39
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	40
3.3 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	41
3.4 ΑΝΑΚΥΚΛΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΟΛΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	44
3.4.1 Πίεση μεγέθους 500	45
3.4.2 Πίεση μεγέθους 600 kPa.....	49
3.4.3 Πίεση μεγέθους 650 kPa	53
3.4.4 Σύγκριση διαγραμμάτων P-U.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	58
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΑΓΟΥ	58
4.2 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	60
4.3 ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΑΓΟΥ	61
4.3.1 Πίεση μεγέθους 800 kPa	61
4.3.2. Πίεση μεγέθους 900 kPa.....	64
4.3.3 Πίεση μεγέθους 950 kPa	67
4.3.4 Διαγράμματα μετατοπίσεων και P-U	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Θεωρητικά στοιχεία

1.1 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Κάθε μεταλλική κατασκευή ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τη χρήση της υπόκειται σε φορτίσεις οι οποίες επιφέρουν διάφορα προβλήματα στην απόκριση της κατασκευής. Όταν μάλιστα αναφερόμαστε σε θαλάσσιες κατασκευές- όπου οι ενισχυμένες μεταλλικές πλάκες έχουν ευρεία εφαρμογή- αντιλαμβανόμαστε πως έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο περιβάλλον φόρτισης. Παρακάτω θα γίνει μια στοιχειώδης αναφορά στα είδη των φορτίσεων και στο πως αυτές διαχωρίζονται με βάση τη φύση τους και τη μεταβλητότητα τους, δηλαδή τη διάρκεια στο χρόνο.

Είδη φορτίσεων

Οι δύο βασικές κατηγορίες φόρτισης είναι η στατική και η δυναμική φόρτιση. Η πρώτη είναι η φόρτιση όπου δεν μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου και χαρακτηριστικό της οποίας είναι η μη ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων στα στοιχεία της κατασκευής. Οι δεύτερες δε, δηλαδή οι δυναμικές φορτίσεις είναι αυτές των οποίων το μέτρο, η διεύθυνση ή/και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Η δυναμική ανάλυση είναι πολύ πιο σύνθετη, καθώς—εκτός από τις ελαστικές δυνάμεις—ενέχει δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις απόσβεσης ενέργειας.

Παραδείγματα στατικών φορτίσεων που αφορούν κυρίως το θαλάσσιο περιβάλλον είναι οι καμπτικές και τέμνουσες δυνάμεις σε ήρεμο νερό, διαμήκης κάμψη και τέμνουσες σε

ψευδοστατικό κύμα και οι συγκεντρωμένες φορτίσεις σε καταστρώματα. Από την άλλη, δυναμικές που αφορούν και το θαλάσσιο περιβάλλον φόρτισης αποτελούν οι ανεμοπιέσεις, οι εκρήξεις (ατμοσφαιρικές ή υποθαλάσσιες) οι συγκρούσεις, η σφυρόκρουση (φόρτιση που αφορά αποκλειστικά σε θαλάσσιες κατασκευές) και η πλεύση σε πάγο.

Κάποιες από αυτές τις φορτίσεις θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια παρ'όλα αυτά στη παρούσα διπλωματική εργασία η μελέτη της απόκρισης της κατασκευής έχει γίνει προσεγγιστικά για στατικές φορτίσεις.

Ανακύκλωση της φόρτισης -Θεώρημα προσαρμογής

Η ανακυκλιζόμενη φόρτιση ορίζεται ως η συνεχής και επαναλαμβανόμενη επιβολή ενός φορτίου στη διάρκεια κάποιων κύκλων. Η κυκλική φόρτιση αναγκάζει τα υλικά να υποβαθμιστούν λόγω κόπωσης, συχνά σε χαμηλότερα φορτία και μετά από μικρότερο χρονικό διάστημα από το κανονικά αναμενόμενο. Ωστόσο στη συγκεκριμένη περίπτωση "εισχωρούμε πολύ βαθιά" στη πλαστική περιοχή όπου δεν ισχύουν πλέον οι καμπύλες Wöhler και η κατασκευή μπορεί να ακολουθήσει μια άλλη πορεία απόκρισης ανάλογα με το επίπεδο της φόρτισης.

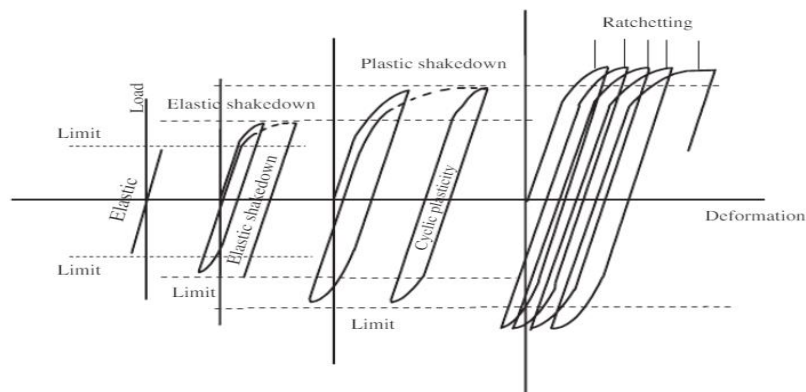
Σε αυτή τη περίπτωση λοιπόν για κατασκευές οι οποίες συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά παρουσιάζονται τέσσερα πιθανά σενάρια συμπεριφοράς :

- Στη περίπτωση που το φορτίο είναι αρκετά μικρό, εμφανίζεται καθαρά ελαστική συμπεριφορά. Η τροπή μηδενίζεται κατά την πλήρη απομάκρυνση του φορτίου και πουθενά στην κατασκευή δεν εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση.
- Αν το επίπεδο του φορτίου που εφαρμόζεται είναι πάνω από το φορτίο διαρροής τότε σε κάποια σημεία της κατασκευής εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις. Μπορεί όμως μετά από ορισμένο αριθμό κύκλων η κατασκευή να παρουσιάσει ελαστική συμπεριφορά και να προσαρμοστεί στο φορτίο ανακύκλωσης.
- Σε αυτή τη περίπτωση το φαινόμενο αυτό καλείται προσαρμογή (shakedown) και ως όριο προσαρμογής καλείται το κρίσιμο όριο φορτίου για το οποίο συμβαίνει το φαινόμενο αυτό.

- Αν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο φορτίο δηλαδή το φορτίο προσαρμογής, τότε η κατασκευή παρουσιάζει εναλλασσόμενη πλαστικότητα. Στη περίπτωση αυτή μπορεί το μέγεθος της συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης να μην είναι μεγάλο παρόλα αυτά μπορεί να επέλθει αστοχία μετά από λίγους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης εξ αιτίας της εναλλασσόμενης πλαστικής κατάρρευσης. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται πλαστική κατάρρευση.

- Αν το φορτίο είναι μεγάλο και ξεπερνά κατά πολύ το φορτίο διαρροής και σε κάθε κύκλο φόρτισης προστίθενται οι παραμορφώσεις στις προηγούμενες, η κατασκευή θα καταρρεύσει λόγω συσσωρευμένων πλαστικών παραμορφώσεων. Αυτό το φαινόμενο καλείται ως "ratcheting".

Οι περιπτώσεις αυτές που μόλις περιγράφηκαν παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 1. Κατηγορίες shakedown απόκρισης σε κυκλική φόρτιση (Johnson, 1986).

Επομένως από το φαινόμενο αυτό της προσαρμογής ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που πρέπει να σημειωθεί είναι αυτό του συμπεράσματος του πως ακόμη και σε αρκετά μεγάλες φορτίσεις οι οποίες προκαλούν πλαστικοποίηση, οι περεταίρω επαναλήψεις του μπορούν να μην προκαλέσουν επιπρόσθετη παραμόρφωση στην περίπτωση που αυτό το φορτίο είναι μικρότερο από αυτό του οριακού φορτίου.

Και ένα δεύτερο στοιχείο που δείχνει επίσης τη σπουδαιότητα της ανάλυσης αυτής είναι αυτό της αστοχίας του υλικού στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης για επίπεδα μικρότερα από αυτά της μονοτονικής. Πράγμα που μένει να διαπιστωθεί και στη συνέχεια από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Θεωρήματα προσαρμογής

Σε αντιστοιχία με τα θεωρήματα της οριακής ανάλυσης της κλασσικής θεωρίας της πλαστικότητας αναπτύχθηκαν και για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση δύο θεωρήματα άνω και κάτω ορίου.

Θεώρημα κάτω ορίου

Το θεώρημα κάτω ορίου διατύπωσε ο Melan 1938, σύμφωνα με το οποίο αν μπορεί να βρεθεί κάποιο αυτοισορροπούν πεδίο παραμενουσών τάσεων, σ_{ij}^r το οποίο, όταν συνδυάζεται με ένα ελαστικό πεδίο τάσεων, δεν παραβιάζει πουθενά την συνθήκη διαρροής, τότε η κατασκευή υπόκειται σε προσαρμογή υπό ανακυκλιζόμενα φορτία. Αν το φορτίο εφαρμογής υποδηλώνεται με $\lambda \cdot p_0$ και λ αδιάστατη παράμετρος κλίμακας τότε όλες οι επαγόμενες συνιστώσες της ελαστικής τάσης είναι επίσης ανάλογες του λ .

Έχουμε

$$f(\lambda \sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^r) \leq 0,$$

όπου,

$\lambda \sigma_{ij}^e$: ελαστικό πεδίο τάσης λόγω της εφαρμοζόμενης πίεσης p_0

$f(\sigma_{ij}) = 0$: είναι η συνθήκη ισορροπίας για το υλικό

Η μεγαλύτερη τιμή του λ που προκύπτει από την αναζήτηση όλων των πιθανών αυτοϊσορροπούντων πεδίων παραμενουσών τάσεων,

σ_{ij}^r , θα δώσει το πραγματικό όριο shakedown για το φορτίο, που ισούται με $p_{sd} = \lambda_{sd} \cdot p_0$.

Θεώρημα άνω ορίου

Αντιστρόφως σύμφωνα με το θεώρημα του Koiter 1960, φαινόμενο προσαρμογής δεν θα συμβεί στη περίπτωση που υπάρξει ένα κινηματικά αποδεκτό πεδίο για το οποίο το έργο των εξωτερικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης να είναι μεγαλύτερο από το έργο των εσωτερικών δυνάμεων.

Έτσι έχουμε :

$$\int_0^t dt \iint_S p_0 \cdot \dot{u}_{ij} dS > \int_0^t dt \iiint_V \sigma_{ij}^k \cdot \varepsilon_{ij}^k dV$$

όπου

\dot{u}_{ij} : η ταχύτητα μετατόπισης

S : η επιφάνεια της κατασκευής στην οποία ασκούνται τα επιφανειακά φορτία.

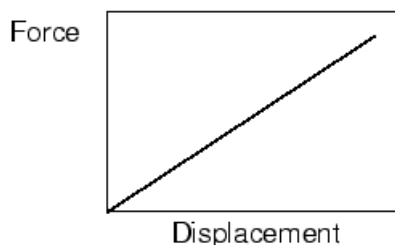
σ_{ij}^k : οι τάσεις στην επιφάνεια διαρροής

V : ο όγκος της κατασκευής

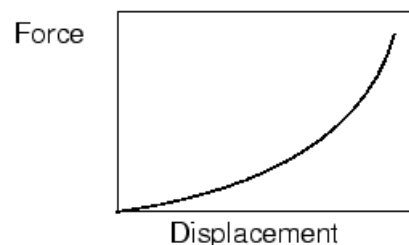
1.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Γραμμικές σχέσεις ονομάζονται αυτές για τις οποίες υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ των φορτίων επιβολής και της απόκρισης του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση της κατασκευής σε κάθε περίπτωση φόρτισης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα της φόρτισης με το ανεστραμμένο μητρώο στιβαρότητας (stiffness matrix) που διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο της επιβαλλόμενης φόρτισης.

Αντιθέτως σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα η κλίση της καμπύλης φόρτισης – μετατόπισης αλλάζει συνεχώς όσο παραμορφώνεται. Είναι γεγονός ότι όλες οι φυσικές κατασκευές στη πραγματικότητα είναι μη γραμμικές. Η γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιούνται ουσιαστικά μόνο για σχεδιαστικούς σκοπούς ως μια προσέγγιση λόγω της ευκολίας τους. Ένα απλό παράδειγμα μιας μη γραμμικής συμπεριφοράς αποτελεί ένα ελατήριο με μη γραμμική ακαμψία. (βλ. Σχήμα 2).



Linear spring.
Stiffness is constant.



Nonlinear spring.
Stiffness is not constant.

Σχήμα 2. Απεικόνιση σχέσης δύναμης-μετατόπισης ενός ελατηρίου με σταθερό και μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας.

Σε μια μη γραμμική ανάλυση, το μητρώο στιβαρότητας πρέπει να κατασκευαστεί και να αντιστραφεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, καθιστώντας πολύ πιο δαπανηρή την επίλυση από μια γραμμική ανάλυση.

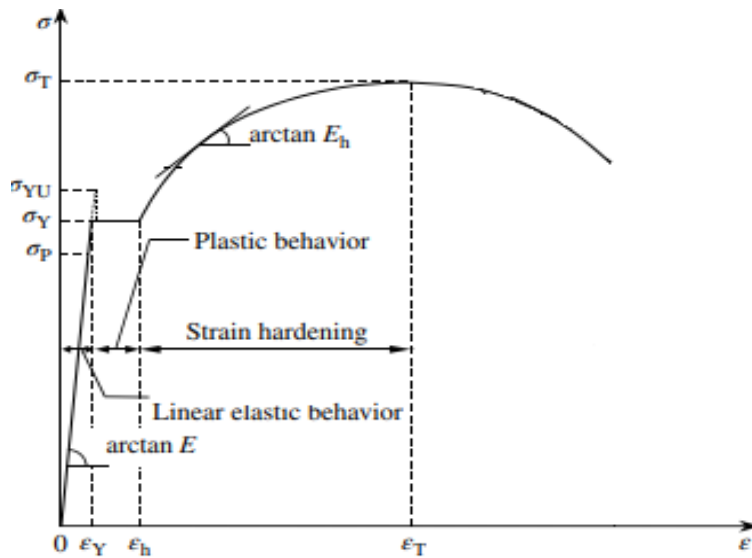
Με δεδομένο λοιπόν ότι η απόκριση ενός μη γραμμικού συστήματος δεν είναι γραμμική συνάρτηση του μεγέθους του εφαρμοζόμενου φορτίου, δεν είναι δυνατή η εύρεση λύσεων με υπέρθεση.

Η μη γραμμικότητα στις κατασκευές προκύπτει κυρίως από τη μη γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας. Παρακάτω θα γίνει λεπτομερής αναφορά για τη πρώτη περίπτωση καθώς ήταν η κύρια περίπτωση μη γραμμικότητας που μας απασχόλησε στη μοντελοποίηση του φορέα.

Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας προφανώς και αποτελεί επίσης σημαντικό πεδίο απασχόλησης, παρ'όλα αυτά προσεγγιστικά δεν έγινε ούτε θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων καθώς και δεν θεωρήθηκαν αρχικές τάσεις στη κατασκευή με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη διερεύνηση να μην αποτελέσει παράμετρο της παρούσας μελέτης.

Μη γραμμικότητα του υλικού

Ο τύπος αυτής της μη γραμμικότητας είναι ο πιο συνηθισμένος. Για πολύ μικρές τιμές της παραμόρφωσης ισχύει η γραμμική ελαστική συμπεριφορά όπου η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται γραμμικά μέσω της σχέσης του Hooke $\sigma = \varepsilon \cdot E$. Όσο οι τιμές της παραμόρφωσης αυξάνονται, κάποια στιγμή θα φτάσει στο σημείο διαρροής που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής (yielding stress, σ_y) και εκεί γίνεται η μετάβαση από την ελαστική στη πλαστική περιοχή. Αυτό σημαίνει ότι πλέον η απόκριση γίνεται μη γραμμική και αναστρέψιμη και η κατασκευή από αυτό το σημείο και έπειτα δεν θα επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση αλλά θα έχει πλαστικές παραμένουσες παραμορφώσεις.

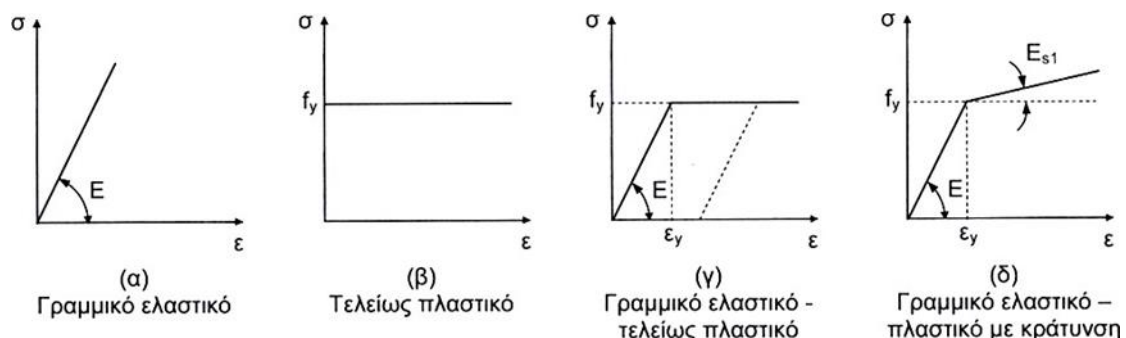


Σχήμα 3. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του χάλυβα

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνονται διακριτά όλα τα σημεία που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του χάλυβα, αξίζει όμως να σημειωθεί πως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που απεικονίζονται αποτελούν συμβατικά μεγέθη και είναι διαφορετικά από τα πραγματικά. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην αλλαγή της διατομής του δοκιμίου που εξετάζεται.

Η πλαστική συμπεριφορά ενός υλικού περιγράφεται από το σημείο διαρροής και τη σκλήρυνσή του μετά την διαρροή του. Κάθε διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται για τη περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού πηγάζει από διαφορετικές παραδοχές που οδηγούν σε διαφορετική ανάλυση στην κάθε περίπτωση.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις και περιγράφεται αυτό που ανταποκρίνεται στην επιλογή της παρούσας ανάλυσης.



Σχήμα 4. Τυπικές μορφές διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων.

Χρησιμοποιούμε μια μοντελοποίηση που βασίζεται στη γραμμικοποίηση της συμπεριφοράς μετά το σημείο διαρροής. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι αυτό του ελαστικού – τελείως πλαστικού υλικού. Επομένως οι συνέπειες της κράτυνσης στην πλαστική περιοχή αμελούνται

το οποίο σημαίνει πως το μέτρο ελαστικότητας στην περιοχή αυτή ισούται με μηδέν. Στην πραγματικότητα πιθανώς θα υπάρξει κάποια σκλήρυνση, αλλά η υπόθεση μας είναι συντηρητική και υπέρ της ασφαλείας καθώς αν το υλικό σκληρύνει, οι πλαστικές παραμορφώσεις θα είναι λιγότερες από αυτές που προβλέπονται από την προσομοίωση.

1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

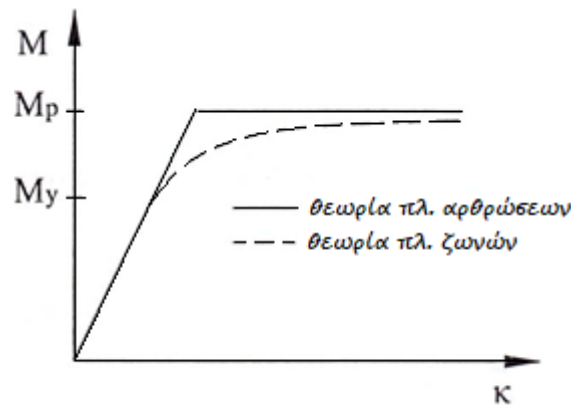
Η πλαστική ανάλυση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή ελαστική ανάλυση. Τα κυριότερα από αυτά έγκειται στην "οικονομία" της σχεδίασης, τις απλοποιητικές διαδικασίες καθώς και της πιο αξιόπιστης προσομοίωσης, δηλαδή πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα της απόκρισης.

Πλαστική άρθρωση

Τη στιγμή που μια διατομή ενός καμπτόμενου τμήματος φτάσει σε πλήρη πλαστικοποίηση, τότε αυτό συμπεριφέρεται πλέον σαν μια άρθρωση. Δηλαδή, στη διατομή που έχει διαρρεύσει είναι δυνατές μεγάλες στροφές, θεωρητικά άπειρες αλλά στην πράξη περιοριζόμενες από τη θραύση των ακραίων ινών, χωρίς μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή. Αυτό περιγράφεται ως πλαστική άρθρωση. Στις πλαστικές αρθρώσεις, σε αντίθεση με τις πραγματικές αρθρώσεις στις οποίες δεν αναπτύσσεται καμιά ροπή, οι στροφές πραγματοποιούνται υπό σταθερή ροπή, ίση με την πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M_{pl} . Οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται πρώτα σε εκείνες τις διατομές ενός φορέα, όπου αναπτύσσεται η μέγιστη καμπυλότητα, και επομένως και η μέγιστη ροπή κάμψης.

Στην ουσία η πλαστικοποίηση είναι σταδιακή και τη στιγμή που οι τάσεις στις ακραίες ίνες της διατομής ξεπερνάνε τη διαρροή, τότε αρχίζει η καμπύλωση του διαγράμματος. Επιπλέον σταδιακή θεωρείται και η ελάττωση της δυσκαμψίας μέχρι τη πλήρη πλαστικοποίηση όλης της διατομής. Αυτή η ανάλυση μπορεί να προσομοιωθεί με την θεωρία πλαστικών ζωνών, αλλά χρησιμοποιείται σπανιότερα.

Η χρήση θεωρίας πλαστικών αρθρώσεων είναι υπολογιστικά πολύ ευχερέστερη και συμβατή με ραβδωτά στοιχεία δοκού, ενώ για την εφαρμογή της θεωρίας πλαστικών ζωνών απαιτούνται συνήθως επιφανειακά ή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου.



Σχήμα 5. Διαγράμματα ροπής- καμπυλότητας για τις θεωρίες πλαστικών ζωνών και αρθρώσεων.

Σημαντική επισήμανση αποτελεί το γεγονός πως οι πλαστικοποιημένες διατομές διαθέτουν την ιδιότητα να μπορούν να παραλαμβάνουν τάσεις με ελαστικό τρόπο σε περίπτωση αποφόρτισης ή αντιστροφής φορτίων, μέχρι να υπερβούν τη διαρροή οι αντίστροφα πλέον τάσεις και να επιφέρουν εκ νέου δημιουργία άλλων πλαστικών αρθρώσεων.

1.4 ΜΠΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη εφαρμογή μητρωικής ανάλυσης κατασκευών αποδίδεται στον Livesley το 1953 με εφαρμογή στις πλαισιωτές κατασκευές. αεροναυπηγική λόγω της ανάγκης για λύση στα πολύπλοκα προβλήματα που προέκυπταν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Η γέννηση της σκέψης για ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική λόγω της ανάγκης για λύση στα πολύπλοκα προβλήματα που προέκυπταν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το κίνητρο που δόθηκε από την ανάγκη αυτή οδήγησε στη θεμελίωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων από τους Αργύρη. Turner και Clough.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπήρξε κατά το παρελθόν η πιο δημοφιλής μέθοδος αλλά σύντομα η ευελιξία και η γενικότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων την

καθιέρωσαν ως την "κυρίαρχη" αριθμητική μέθοδο σε μια ευρύτατη κλίμακα επιστημονικών διαφορών.

Την τελευταία εικοσαετία νέες επιστημονικές μέθοδοι έχουν διατυπωθεί, όπως η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων, παρ' όλα αυτά η απήχηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στους επιστήμονες και μηχανικούς συνεχώς διευρύνεται.

Γενικά

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα διακριτοποίησης του χώρου, δηλαδή ο διαχωρισμός του σε μικρών διαστάσεων υποχώρους (στοιχεία). Με αυτόν τον τρόπο ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου χρησιμοποιούνται μαθηματικά προσομοιώματα που βασίζονται σε διάφορες θεωρίες.

Τα πεπερασμένα στοιχεία κελυφών διακρίνονται σε 3 κατηγορίες :

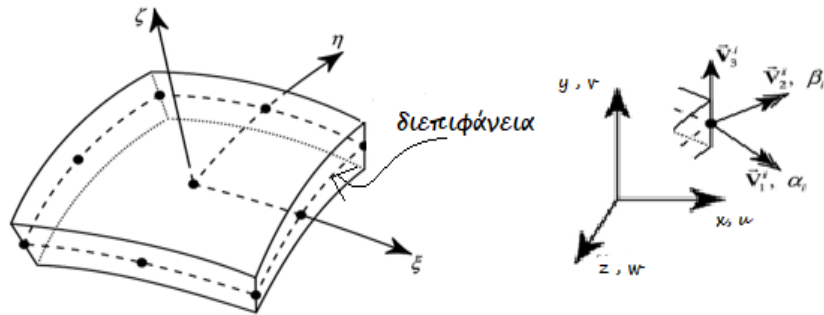
1. Επίπεδα τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία. Είναι σχετικά απλά αλλά παρουσιάζουν αδυναμίες όπως η μειωμένη ακρίβεια και η ασυνέχεια των καμπτικών ροπών.
2. Καμπύλα στοιχεία βασισμένα σε διάφορες θεωρίες αναλύσεως κελυφών.
3. Εκφυλισμένα τρισδιάστατα στοιχεία. Εδώ οι εξισώσεις του συνεχούς μέσου στον τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιούνται άμεσα και έτσι αποφεύγεται η περιπλοκότητα των γενικών θεωριών των κελυφών.

Αναφορικά παρατίθενται τα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων, χωρίς να γίνει λεπτομερής ανάλυση και παρουσίαση όλων των μαθηματικών εκφράσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτή.

- i. Αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός της κατασκευής σε τμήματα σε ένα αριθμό πεπερασμένων στοιχείων τα οποία συνδέονται το καθένα μεταξύ τους με πεπερασμένους κόμβους.
- ii. Στην συνέχεια γίνεται ο καθορισμός των συναρτήσεων που ορίζουν τις μετατοπίσεις σε κάθε στοιχείο οι οποίες εξαρτώνται από τις επικόμβιες μετατοπίσεις. Αυτές οι συναρτήσεις είναι που καθορίζουν το πεδίο παραμορφώσεων οι οποίες με τη σειρά τους μέσα από τις καταστατικές σχέσεις ορίζουν το πεδίο των τάσεων.
- iii. Ένα σύστημα δυνάμεων συγκεντρωμένο στους κόμβους ισορροπεί τις συνοριακές τάσεις και τα τυχόν κατανεμημένα φορτία και οδηγεί σε μια σχέση ακαμψίας και στο μητρώο ακαμψίας του στοιχείου.
- iv. Μορφώνεται το συνολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής από τα επιμέρους μητρώα των στοιχείων και επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας.
- v. Τέλος ακολουθεί ο υπολογισμός των τάσεων και παραμορφώσεων.

Βαθμοί ελευθερίας

Οι βαθμοί ελευθερίας (dof) είναι οι βασικές μεταβλητές που υπολογίζονται κατά την ανάλυση. Για μια προσομοίωση τάσης/μετατόπισης, οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι μεταφράσεις σε κάθε κόμβο. Ορισμένες οικογένειες στοιχείων, όπως οι οικογένειες δοκών και κελύφους, έχουν και περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Οι μετατοπίσεις, οι περιστροφές και οι άλλοι βαθμοί ελευθερίας υπολογίζονται μόνο στους κόμβους του στοιχείου. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του στοιχείου, οι μετατοπίσεις λαμβάνονται με παρεμβολή από τις κομβικές μετατοπίσεις.



Σχήμα 6. Απεικόνιση στοιχείου shell και οι βαθμοί ελευθερίας του

Όπως φαίνεται και στην σχήμα 6 στο τελευταίο σχήμα δεξιά σε κάθε κόμβο καθορίζονται πέντε βαθμοί ελευθερίας. Αυτοί αντιστοιχούν στις τρεις μεταφορικές μετατοπίσεις και στις δυο στροφές του κάθετου στη διεπιφάνεια του κελύφους στη θέση του αντίστοιχου κόμβου. Ο καθορισμός ανεξάρτητων στροφικών και μεταφορικών βαθμών ελευθερίας επιτρέπει να ληφθεί υπόψη και η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση και ισοδυναμεί με τη θεώρηση μιας γενικής θεωρίας κελυφών ανάλογη με εκείνη της θεωρίας Mindlin των πλακών. Τα στοιχεία αυτά υπερέχουν έναντι των στοιχείων που προέρχονται από το συνδυασμό στοιχείων πλακών με μεμβρανική συμπεριφορά στο ότι διακριτοποιούν ακριβέστερα οποιαδήποτε επιφάνεια κελύφους, ικανοποιούν τη συνθήκη συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ των στοιχείων, χρησιμοποιούνται ως μεταβατικά στοιχεία μεταξύ τρισδιάστατου μέσου και κελύφους.

Επιλογή στοιχείων βάσει χαρακτηριστικών προβλήματος

Τα στοιχεία κελυφών (Shell) χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν επιφανειακούς φορείς των οποίων η μία διάσταση (το πάχος) είναι σημαντικά μικρότερη από τις άλλες και στις οποίες οι τάσεις στην κατεύθυνση του πάχους είναι αμελητέες. Μια κατασκευή της οποίας το πάχος είναι μικρότερο από 1/10 μιας διάστασης, μπορεί να μοντελοποιηθεί με στοιχεία κελύφους.

Για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας το γεγονός ότι τα ελάσματα του πλοίου αλλά και τα ενισχυτικά έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε χρήση αυτών των στοιχείων κελύφους (shell elements).

Τα στοιχεία S4R έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα στοιχεία S4, δηλαδή τη μεγάλη του ευελιξία στη χρήση καθώς και της δυνατότητας τους για μοντελοποίηση τόσο plane stress όσο και plane strain elements. Η μοναδική διαφορά που παρουσιάζουν αυτά τα στοιχεία

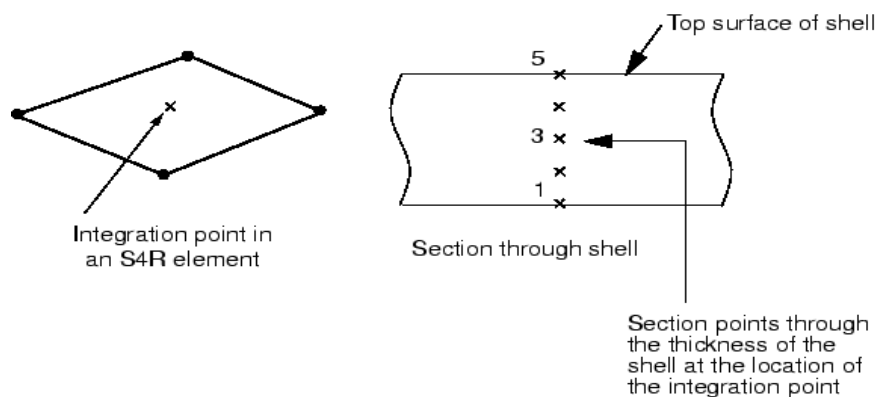
έγκειται στα σημεία ολοκλήρωσης. Το S4R χρησιμοποιεί μόνο ένα σημείο ολοκλήρωσης σε αντίθεση με το 4 σημεία των στοιχείων S4 και συνεπώς είναι πιο οικονομικά. Πιο λεπτομερής αναφορά για τα χαρακτηριστικά που πρέπει να λάβουμε υπόψη στην επιλογή των στοιχείων γίνεται στη συνέχεια [Abaqus analysis manual].

Μειωμένη ολοκλήρωση (reduced integration)

Το γράμμα "R" που χρησιμοποιείται στο τέλος του ονόματος στοιχείων δηλώνει τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration). Για παράδειγμα, το CAX4 είναι το 4-κόμβο, πλήρους ολοκλήρωσης, γραμμικό, αξονοσυμμετρικό στερεό στοιχείο και το CAX4R είναι η έκδοση με μειωμένη ενσωμάτωση του ίδιου στοιχείου.

Οι περισσότεροι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων (FE) βρίσκουν μια λύση με τον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας στοιχείων και κατόπιν με την αναστροφή του για την επίλυση των μετατοπίσεων στο στοιχείο. Για περίπλοκα προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας στοιχεία υψηλής τάξης, καθίσταται αναγκαία η χρήση αριθμητικής ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας σε κάθε σημείο διατομής μέσω του πάχους του κελύφους, επιτρέποντας έτσι τη συμπεριφορά μη γραμμικού υλικού.

Η διαμόρφωση των σημείων διατομής μέσω του πάχους του κελύφους φαίνονται στο σχήμα 7 που ακολουθεί.



Σχήμα 7. Απεικόνιση σημείου ολοκλήρωσης

Από προεπιλογή, το Abaqus χρησιμοποιεί πέντε σημεία διατομής μέσω του πάχους ενός ομοιογενούς κελύφους, το οποίο επαρκεί για τα περισσότερα μη γραμμικά προβλήματα σχεδίασης. Επίσης έτσι εξηγούνται τα SP1 και SP5 που εμφανίζονται σε όλα τα διαγράμματα.

Η μειωμένη ολοκλήρωση χρησιμοποιεί μικρότερο αριθμό Gauss συντεταγμένων όταν επιλύει το ολοκλήρωμα. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία S4R χρησιμοποιούν μόνο ένα σημείο ολοκλήρωσης και είναι η μοναδική διαφορά τους με τα χαρακτηριστικά των στοιχείων S4. Είναι σαφές ότι, όσο περισσότερες συντεταγμένες Gauss έχουμε για κάθε στοιχείο, τόσο πιο ακριβής θα είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσής, αλλά αυτό πρέπει να σταθμιστεί ενάντια στο κόστος του χρόνου υπολογισμού.

Οι διατυπώσεις πεπερασμένων στοιχείων που βασίζονται σε επιβολή μετακινήσεων, πάντα υπερεκτιμούν το μητρώο ακαμψίας και η χρήση λιγότερων σημείων ολοκλήρωσης πρέπει να παράγει ένα λιγότερο άκαμπτο στοιχείο. Επομένως, σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα μη γραμμικά προβλήματα, όπως πλαστικότητα, ερπυσμός ή ασυμπίεστα υλικά, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μειωμένη ολοκλήρωση αντί για πλήρη ολοκλήρωση. Η ελαφρά απώλεια ακρίβειας αντισταθμίζεται από τη βελτίωση της προσέγγισης με την πραγματική συμπεριφορά.

Πρέπει να δίνεται προσοχή όταν χρησιμοποιείται μειωμένη ολοκλήρωση καθώς σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να προκύψει αστάθεια λόγω μηδενικού μητρώου ακαμψίας. αυτό άλλωστε είναι γνωστό ως λειτουργία hour glass.

1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Newton – Raphson

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που παράγονται στο Abaqus είναι συνήθως μη γραμμικά και μπορούν να περιλαμβάνουν από μερικές έως χιλιάδες μεταβλητών. Από την άποψη αυτών των μεταβλητών, οι εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνονται με τη διακριτοποίηση της εικονικής εξίσωσης εργασίας.

Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί συμβολικά ως:

$$F^N(u^M) = 0 \quad (1)$$

όπου F^N είναι η συνιστώσα δύναμης συζευγμένη με την μεταβλητή N στο πρόβλημα και u^M είναι η τιμή της M μεταβλητής. Το βασικό πρόβλημα είναι η επίλυση της εξίσωσης (1) για το u^M σε όλη την περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Πολλά από τα προβλήματα που θα αντιμετωπίσει το Abaqus εξαρτώνται από την πορεία επίλυσης, οπότε η λύση πρέπει να αναπτύσσεται με μια σειρά "μικρών" αυξήσεων. Έτσι

λοιπόν ανακύπτουν δύο ζητήματα. Το ένα αφορά το πώς η διακριτοποιημένη εξίσωση λύνεται σε κάθε αύξηση και το δεύτερο πώς επιλέγεται το μέγεθος της προσαύξεσης αυτής.

Το Abaqus / Standard γενικά χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Newton ως αριθμητική τεχνική για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας. Το κίνητρο για αυτή την επιλογή είναι κατά κύριο λόγο το ποσοστό σύγκλισης που προκύπτει από τη χρήση της μεθόδου της Newton σε σύγκριση με τα ποσοστά σύγκλισης που παρουσιάζονται με εναλλακτικές μεθόδους (συνήθως τροποποιημένες Newton ή quasi-Newton μέθοδοι). Η βασική μορφή της μεθόδου του Newton ακολουθεί στη συνέχεια.

Ας υποθέσουμε ότι, μετά από μια επανάληψη i έχει βρεθεί μια προσεγγιστική λύση, u_i^M . Έστω λοιπόν, c_{i+1}^M η διαφορά μεταξύ αυτής της λύσης και της ακριβούς λύσης. Τότε η ακριβής λύση της διακριτοποιημένης εξίσωσης (1) είναι η εξής:

$$F^N (u_i^M + c_{i+1}^M) = 0$$

Η ανάπτυξη του αριστερού μέρους αυτής της εξίσωσης σε μια σειρά Taylor σχετικά με την προσεγγιστική λύση u_i^M παρουσιάζεται παρακάτω.

$$F^N(u_i^M) + \frac{\partial F^N}{\partial u^P}(u_i^M)c_{i+1}^P + \frac{\partial^2 F^N}{\partial u^P \partial u^Q}(u_i^M)c_{i+1}^P c_{i+1}^Q + \dots = 0$$

Αν η u_i^M είναι μια προσέγγιση αρκετά κοντινή στην πραγματική λύση τότε το μέγεθος της κάθε διαφοράς c_{i+1}^M θα είναι μικρό και έτσι η παραπάνω σχέση (Taylor) μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων, όπως το ακόλουθο:

$$K_i^{NP} c_{i+1}^P = -F_i^N \quad (2)$$

όπου

$$K_i^{NP} = \frac{\partial F^N}{\partial u^P}(u_i^M)$$

είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας και

$$F_i^F = F^F(u_i^M)$$

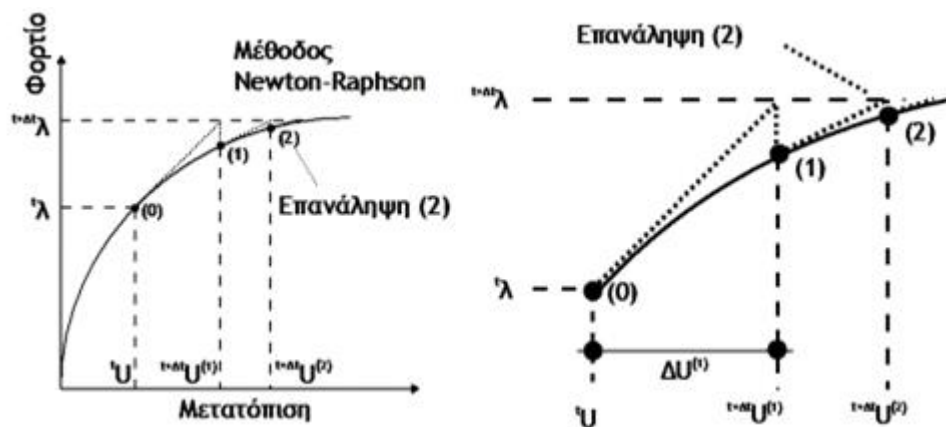
Η επόμενη προσέγγιση στη λύση είναι τότε :

$$u_{i+1}^M = u_i^M + c_{i+1}^M$$

και η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται.

Η σύγκλιση της μεθόδου Newton μετράται με το καλύτερο τρόπο όταν εξασφαλίζεται ότι όλες οι καταχωρήσεις στον F_i^N και c_{i+1}^M είναι αρκετά μικρές. Και τα δύο αυτά κριτήρια ελέγχονται από προεπιλογή σε μια λύση με τη χρήση του Abaqus / Standard.

Επιπλέον το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει τις ανώτατες τιμές των υπολοίπων της δύναμης, τις επαυξήσεις της παραμόρφωσης και τις διορθώσεις στην αυξητική παραμόρφωση σε κάθε επανάληψη έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να ελέγξει τα μεγέθη αυτά. Η μέθοδος του Newton συνήθως αποφεύγεται σε μεγάλους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, προφανώς για δύο λόγους. Πρώτον, το ότι είναι μερικές φορές δύσκολο να σχηματιστεί πλήρης μητρώο Jacobian και για μερικά προβλήματα μάλιστα μπορεί να είναι αδύνατο να ληφθεί αυτός ο πίνακας σε κλειστή μορφή, οπότε πρέπει να υπολογιστεί αριθμητικά - μια ακριβή (και όχι πάντα αξιόπιστη) διαδικασία. Δεύτερον, η μέθοδος είναι δαπανηρή για κάθε επανάληψη, επειδή το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας πρέπει να αναδιαμορφωθεί και να λυθεί ξανά σε κάθε μια επανάληψη.



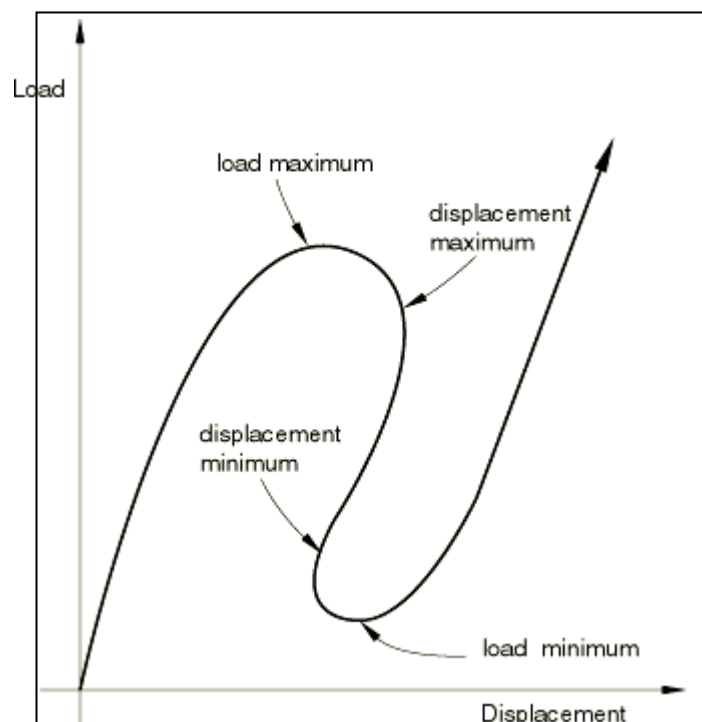
Σχήμα 8. Η μέθοδος Full Newton Raphson και μεγέθυνση στο τρέχον βήμα

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εναλλακτική λύση έναντι του Newton είναι η τροποποιημένη μέθοδος Newton (modified Newton) στην οποία το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας εξίσωση υπολογίζεται εκ νέου μόνο περιστασιακά (ή καθόλου, όπως στην μέθοδο αρχικής παραμόρφωσης των απλών προβλημάτων πλαστικότητας). Παρότι όμως έγινε αναφορά σε αυτές τις εναλλακτικές μεθόδους δεν θα γίνει περεταίρω ανάλυση καθώς δεν έγινε χρήση καμίας στη επίλυση των προβλημάτων της παρούσας εργασίας.

[Abaqus v6.11, theory manual]

1.6 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ RIKS

Η μέθοδος Riks είναι ένας αλγόριθμος που επιφέρει την αποτελεσματική λύση περιπτώσεων όπου κατά τη διάρκεια των περιόδων απόκρισης το φορτίο ή / και η μετατόπιση μπορεί να μειωθεί όσο η λύση προχωράει. Χρησιμοποιείται λοιπόν σε ασταθή προβλήματα για την εύρεση των μη γραμμικών στατικών καταστάσεων ισορροπίας τους και ο τύπος συμπεριφοράς αυτός με τις διακυμάνσεις στην απόκριση του φορτίου μετατόπισης σκιαγραφείται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 9 Παράδειγμα καμπύλης φορτίου – μετατόπισης

Όταν ακόμη οι μέθοδοι τύπου arc-length δεν είχαν ακόμη επινοηθεί οι αναλυτές χρησιμοποιούσαν σε κάποιες περιπτώσεις τεχνητά ελατήρια για αύξηση της δυσκαμψίας, με σκοπό την αποφυγή των οριακών σημείων, αλλά και αυτή η λύση μπορούσε να είναι αποτελεσματική μόνον σε πολύ απλούς φορείς. Δύο αρχικές παραλλαγές της μεθόδου τύπου μήκους τόξου αναπτύχθηκαν περί το 1980 παράλληλα και ανεξάρτητα από τους Crisfield και Riks, ενώ αργότερα προτάθηκαν από άλλους ερευνητές και άλλες παραλλαγές, με στόχο τη βελτιστοποίηση της σύγκλισης και της ταχύτητας.

Η μέθοδος RIKS τροποποιείται στο ABAQUS στη βάση που προτείνει και ο Crisfield (1980) ούτως ώστε να εφαρμοστεί στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Θεωρείται ότι η φόρτιση είναι ευθέως ανάλογη, δηλαδή ότι όλα τα μεγέθη των μεταβαλλόμενων φορτίων εξαρτώνται από ένα κοινό βαθμωτό συντελεστή. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι η απόκριση είναι λογικώς ομαλή, ότι δεν προκύπτουν δηλαδή απότομες αλλαγές (με γωνίες) στη σχέση φόρτισης μετατόπισης.

Η ουσία της μεθόδου είναι ότι η λύση θεωρείται ως η εύρεση μιας μοναδικής διαδρομής ισορροπίας σε ένα χώρο που ορίζεται από τις μεταβλητές του κόμβου και την παράμετρο φόρτισης. Η ανάπτυξη της λύσης απαιτεί να διασχίζουμε αυτή τη διαδρομή όσο απαιτείται. Ο βασικός αλγόριθμος παραμένει η μέθοδος του Newton, επομένως κάθε στιγμή θα υπάρχει μια πεπερασμένη ακτίνα σύγκλισης. Άλλωστε, πολλά από τα υλικά έχουν απόκριση εξαρτώμενη από την διαδρομή ισορροπίας. Για αυτό λοιπόν το λόγο, είναι σημαντικό να περιοριστεί η αύξηση του συντελεστή σε κάθε βήμα της μεθόδου. Στον τροποποιημένο αλγόριθμο Riks, το μέγεθος προσανξήσεως περιορίζεται από τη μετακίνηση μιας δεδομένης απόστασης κατά μήκος της εφαπτόμενης γραμμής στο τρέχον σημείο ισορροπίας στο επίπεδο και έπειτα ψάχνοντας για ισορροπία στο επίπεδο που διέρχεται από το σημείο που αποκτάται και το οποίο είναι ορθογώνιο στην ίδια εφαπτόμενη γραμμή. Εδώ η γεωμετρία που αναφέρεται είναι ο χώρος των μετατοπίσεων, των περιστροφών και της παραμέτρου φορτίου που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ορισμοί βασικών μεταβλητών

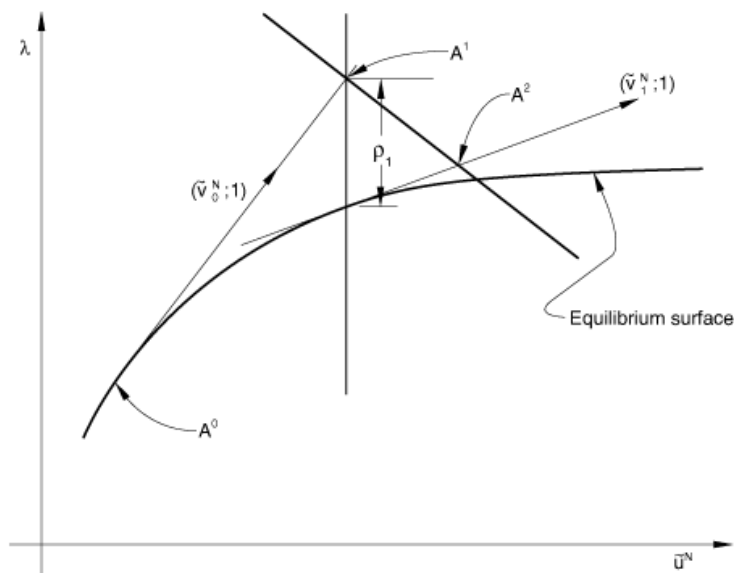
Έστω ότι P^N ($N=1,2,\dots$ = οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου) είναι το πρότυπο φόρτωσης, όπως ορίζεται με μία ή περισσότερες από τις δυνατότητες της φόρτισης. Και έστω λ η παράμετρος μεγέθους του φορτίου, επομένως ανά πάσα στιγμή η πραγματική κατάσταση φορτίου είναι $\lambda \times P^N$, και οι μετατοπίσεις είναι u^N εκείνη τη στιγμή.

Ο χώρος διαλύματος κλιμακώνεται ώστε οι διαστάσεις να έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος σε κάθε άξονα. Αυτό γίνεται με τη μέτρηση της μέγιστης απόλυτης τιμής όλων των μεταβλητών μετατοπίσεων, \bar{u} , στην αρχική γραμμική επανάληψη. Επίσης ορίζουμε $\bar{P} = (P^N)^{1/2}$.

Ο χώρος καθορίζεται από:

- Φορτίο = $\lambda \cdot \bar{P}^N$, $\bar{P}^N = P^N / \bar{P}$
- Μετατοπίσεις = $\tilde{u}^N = (u^N / \bar{u})$;

και η διαδρομή λύσης είναι τότε το συνεχές σύνολο σημείων ισορροπίας που περιγράφονται από το διάνυσμα $(\tilde{u}^N; \lambda)$ σε αυτό το χώρο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στο σχήμα 10. και περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 10. Αλγόριθμος Riks

Ας υποθέσουμε ότι η λύση έχει αναπτυχθεί στο σημείο $A^0 = (\tilde{u}_o^N, \lambda_o)$

Η εφαπτόμενη ακαμψία, K_o^{NM} , έχει σχηματιστεί και λύνουμε

$$K_o^{NM} u_o^M = P$$

Το μέγεθος της προσαύξησης (A_0 στο A_1 , βλ. σχήμα 10) επιλέγεται από ένα συγκεκριμένο μήκος, Δl , στο χώρο λύσης, έτσι ώστε $\Delta \lambda_0^2(\tilde{u}_0^N; 1) : (\tilde{u}_0^N; 1) = \Delta l^2$, και επομένως:

$$\Delta \lambda_0 = \frac{\pm \Delta l}{(\tilde{u}_0^N \tilde{u}_0^{N+1})^{1/2}}$$

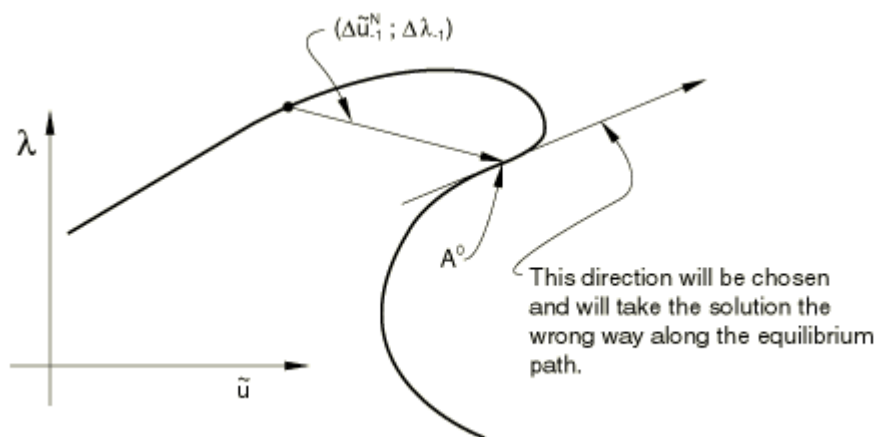
(Εδώ το \tilde{u}_0^N είναι το u_0^N διαιρεμένο με το \bar{u}). Η τιμή του Δl αρχικά εισάγεται από το χρήστη και προσαρμόζεται από το πρόγραμμα με τον αυτόματο αλγόριθμο αύξησης φορτίου για στατικά προβλήματα, βασισμένο στο ποσοστό σύγκλισης. Το πρόσημο του $\Delta \lambda_0$ -η κατεύθυνση της απόκριση κατά μήκος της εφαπτόμενης ευθείας- επιλέγεται έτσι ώστε το εσωτερικό γινόμενο του $\Delta \lambda_0(\tilde{u}_0^N; 1)$ στη λύση της προηγούμενης αύξησης, $(\Delta \tilde{u}_{-1}^N; \Delta \lambda_{-1})$, να είναι θετικό:

$$\Delta \lambda_0(\tilde{u}_0^N; 1) : (\Delta \tilde{u}_{-1}^N; \Delta \lambda_{-1}) > 0$$

Άρα,

$$\Delta \lambda_0(\tilde{u}_0^N \Delta \tilde{u}_{-1}^N + \Delta \lambda_{-1}) > 0$$

Είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις που η απόκριση σημειώνει πολύ μεγάλη καμπυλότητα στον $(\tilde{u}^N; \lambda)$ χώρο, το κριτήριο να προκαλέσει την επιλογή του λάθους σημείου (λάθος πρόσημο), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11. Λάθος σημείο στο δρόμο ισορροπίας

Το λάθος πρόσημο σπανίως επιλέγεται σε πρακτικές περιπτώσεις, εκτός και αν το μέγεθος της αύξησης είναι πολύ μεγάλο ή η λύση αλλάζει καμπυλότητα με οξεία γωνία. Ο έλεγχος σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ δαπανηρός, δηλαδή έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Μια προσέγγιση θα ήταν η λύση να βρίσκεται στο διάστημα $\lambda_0 - \varepsilon \Delta\lambda_{-1}$, $0 < \varepsilon < 1$, έτσι παίρνουμε ένα διάνυσμα το οποίο δίνει μια κοντινή προσέγγιση της προσανατολισμένης εφαπτομένης στο A^0 . Επειδή η περίπτωση είναι τόσο σπάνια, δεν περιλαμβάνεται ένας τέτοιος έλεγχος και το απλό εσωτερικό γινόμενο που δίνεται παραπάνω χρησιμοποιείται για την εύρεση του πρόσημου. Έτσι λοιπόν, έχουμε βρει το σημείο $A^1(\tilde{u}_0^N + \Delta\lambda_0 \tilde{u}_0^N; \lambda_0 + \Delta\lambda_0)$ στο παραπάνω σχήμα. Η λύση τώρα είναι διορθωμένη στη διαδρομή ισορροπίας στο επίπεδο που περνάει από το A^1 και είναι κάθετο στο $(\tilde{u}_0^N; 1)$, από τον επαναληπτικό αλγόριθμο που παρουσιάζεται κάτω.

ο. Έναρξη:

$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_0, \Delta u_i^N = \Delta\lambda_0 u_0^N$$

ο. Για την επανάληψη i ($i=1,2,3,\dots$)

α. Διαμόρφωση I^N, K^{NM} , οι εσωτερικές δυνάμεις στους κόμβους

$$\text{και } I^N = \int_V \boldsymbol{\beta}^N : \boldsymbol{\sigma} dV, \quad K^{NM} = \frac{\partial I^N}{\partial u^M}$$

στην κατάσταση $(u_0^N + \Delta u_i^N; \lambda_0 + \Delta\lambda_i)$ που βρίσκεται στο σημείο του A^i του 2ου σχήματος.

β. Έλεγχος ισορροπίας:

$$R_i^N = (\lambda_0 + \Delta\lambda_i) P^N - I^N$$

Αν οι παράμετροι R_i^N που έχουν εισαχθεί είναι αρκούντως μικρές, η επανάληψη έχει συγκλίνει. Αν όχι συνεχίζουμε.

γ. Επίλυση:

$$K^{NM} \{u_i^M; c_i^M\} = \{P^N; R_i^N\}$$

Έτσι λύνουμε ταυτόχρονα με δύο διανύσματα φόρτισης P^N και R^N και λαμβάνουμε δύο διανύσματα μετατόπισης, u_i^N και c_i^N .

δ. Τώρα το διάνυσμα $(\tilde{u}_i^N; 1)$ τίθεται υπό κλίμακα και αθροίζεται στο $(\tilde{c}_i^N; \rho_i)$

Όπου $\rho_i = R_i^N P^N / \bar{P}^2$ είναι η προβολή των υπολειμματικών, που έχουν τεθεί υπό κλίμακα στο \bar{P}^N , έτσι ώστε να μετακινούμαστε από το A^i στο A^{i+1} πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στο $(\tilde{u}_0^N; 1)$.

Αυτό δίνει την εξίσωση:

$$\{(0; -\rho_i) + (\tilde{c}_i^N; \rho_i) + \mu(\tilde{u}_i^N; 1)\} : (\tilde{u}_0^N; 1) = 0,$$

που απλοποιείται στην:

$$\mu = -\frac{\tilde{c}_i^N \tilde{u}_0^N}{\tilde{u}_i^N \tilde{u}_0^N + 1},$$

Και το σημείο της λύσης ώρα είναι το A^i :

$$(u_0^N + \Delta u_i^N + c_i^N + \mu u_i^N; \lambda_0 + \Delta \lambda_i + \mu).$$

ε. Ενημέρωση δεδομένων για την επόμενη επανάληψη

$$\Delta u_{i+1}^N = \Delta u_i^N + c_i^N + \mu u_i^N$$

$$\Delta \lambda_{i+1} = \Delta \lambda_i + \mu$$

$$i = i + 1$$

Και επιστροφή στην αρχική.

Η εκτέλεση στο πρόγραμμα περιλαμβάνει μια επιπλέον ενημέρωση μετά από κάθε επανάληψη: $u_0^N = u_i^N$

Αυτό οδηγεί την έρευνα για την εύρεση ισορροπίας να είναι ορθογώνια στην τελευταία εφαπτομένη, αντί για την εφαπτομένη στην αρχή της αύξησης. Το κύριο κίνητρο για αυτή την πρόσθετη τροποποίηση προέρχεται από τη χρήση της μεθόδου σε προβλήματα πλαστικότητας, όπου η πρώτη επανάληψη κάθε αύξησης χρησιμοποιεί το ελαστικό μητρώο ακαμψίας για να ορίσει την κατεύθυνση της παραμόρφωσης και έτσι έχει ως αποτέλεσμα μια ακαμψία η οποία δεν είναι αντιπροσωπευτική της εφαπτομένης στη διαδρομή ισορροπίας εφόσον προκύπτει ενεργός πλαστικότητα.

Το συνολικό μήκος της διαδρομής που διασχίζεται καθορίζεται από τα μεγέθη των φορτίων που εισάγονται, καθώς και ο αριθμός των αυξήσεων καθορίζεται από αντίστοιχες παραμέτρους εισαγωγής. [Abaqus v6.11, Theory Guide]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μελέτη της απόκρισης ναυπηγικού ελάσματος δίχως ενισχυτικά

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Για να βεβαιωθούμε ότι η μεθοδολογία που επιλέξαμε παρέχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα κρίθηκε σκόπιμη η δοκιμή της απόκριση ενός τυπικού ελάσματος δίχως ενισχυτικά, με τα ίδια χαρακτηριστικά με της κατασκευής μας. Για το συγκεκριμένο τύπο φορέα υπάρχουν τόσο αναλυτικές σχέσεις όσο και πειραματικά αποτελέσματα με τα οποία συγκρίθηκαν και τα δικά μας.

Επομένως για την αναλυτική επίλυση εξετάζουμε έλασμα από μαλακό χάλυβα με διαστάσεις 850mm*2670mm και με πάχος 18mm. Οι διαστάσεις του ελάσματος είναι οι τυπικές ενός ναυπηγηθέντος ελάσματος και για αυτό τις επιλέγουμε. Τα στοιχεία του υλικού είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας $E = 207 \text{ GP}$
- Όριο διαρροής $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,3$

Το έλασμα θεωρείται πακτωμένο στις πλευρές, δηλαδή οι πλευρές είναι περιορισμένες και για τους 6 βαθμούς ελευθερίας (δεν επιτρέπονται κινήσεις και περιστροφές και για τους τρεις άξονες). Πάνω στην επιφάνεια του ελάσματος ασκείται ομοιόμορφη πίεση σε όλη την επιφάνεια.

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Πριν όμως από τη μελέτη οποιασδήποτε απόκρισης του φορέα, ένα ζήτημα που θεωρήθηκε πως έχει νόημα να διερευνηθεί και να σχολιαστεί, είναι η βέλτιστη επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η επιλογή των στοιχείων S4R έγινε με κύριο κριτήριο την οικονομικότητά τους.

Στην ίδια βάση λοιπόν θεωρήθηκε σωστό να γίνει και μια διερεύνηση που αφορά το πλέγμα των στοιχείων με σκοπό την εύρεση αυτού που θα διασφαλίζει τον λιγότερο κόστος σε υπολογιστικό χρόνο αλλά να δίνει παράλληλα όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Παρακάτω λοιπόν παρατίθενται πίνακας με τα δοκιμαστικά πλέγματα με το αποτέλεσμα το οποίο εξετάζεται να είναι η μέγιστη μετατόπιση.

Μέγεθος πλευράς του στοιχείου (mm)	Πλέγμα	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
20	43*134	5.56
40	21*67	5.335
50	17*53	5.315
80	11*33	5.112
100	9*27	4.897
200	4*13	3.822

Σχήμα 12. Επιλογή πλέγματος πεπερασμένων

Συνεπώς με τα προαναφερθέντα κριτήρια της οικονομικότητας-ακρίβειας, η τελική μας επιλογή είναι το πλέγμα μεγέθους πλευράς 50mm, καθώς θεωρείται ότι αποτελεί το πιο «αραιό» πλέγμα που προσεγγίζει αρκετά τα αποτελέσματα που δίνουν τα πιο «πυκνά» πλέγματα.

2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΔΙΧΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ

Ο Jones (1975) απέδωσε την αντοχή κατάρρευσης μιας ορθογώνιας πλάκας υπό φορτία πλευρικής πίεσης με τη μέθοδο της άκαμπτης-πλαστικής θεωρίας χωρίς να υπολογίζεται το φαινόμενο μεγάλης εκτροπής:

Για ένα απλά στηριζόμενο έλασμα :

$$\frac{8M_P}{b^2} (1 + \alpha + \alpha^2) \leq p_u \leq \frac{24M_P}{b^2} \frac{1}{(\sqrt{3+\alpha^2}-\alpha)^2} \quad (3)$$

για ένα πακτωμένο έλασμα :

$$\frac{16M_P}{b^2} (1 + \alpha^2) \leq p_u \leq \frac{48M_P}{b^2} \frac{1}{(\sqrt{3+\alpha^2}-\alpha)^2} \quad (4)$$

όπου,

p_u είναι η δύναμη κατάρρευσης

M_P : η πλήρης πλαστική κάμψη

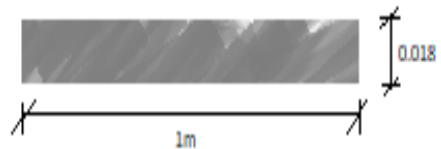
b : το πλάτος του ελάσματος ίσο με 0,85 m

α : ο λόγος πλάτους προς μήκους του ελάσματος (b/a) ίσος με 0,318

Για τον υπολογισμό των στοιχείων που απαιτεί η εξίσωση, υπολογίζεται για μια ισοδύναμη λωρίδα πλάτους ενός μέτρου, και επομένως για τη διατομή με διαστάσεις :

Η ροπή αδράνειας : $I_z = b \cdot h^3 / 12 = 4.86 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$

Η απόσταση από το κ.β άξονα: $z_a = z_k = 2I_y / h = 5.4 \cdot 10^{-5}$



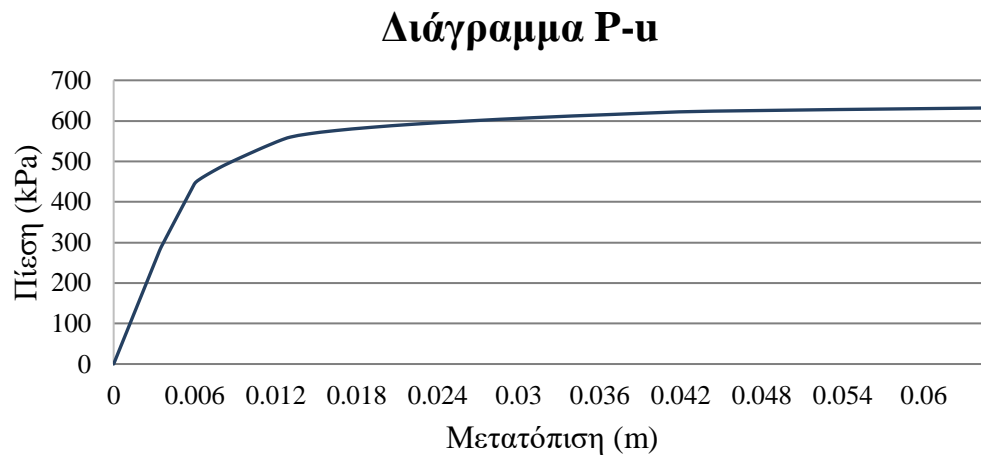
Συνεπώς η τιμή της πλαστικής ροπής υπολογίζεται σε :

$$M_P = b \cdot h^2 \sigma_y / 4 = 19.035 \text{ kNm}$$

Και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) καθώς αυτή είναι που ανταποκρίνεται στις δικές μας συνθήκες στήριξης, προκύπτει ότι:

Το άνω όριο: $p_{upp} = 607,327 \text{ kPa}$

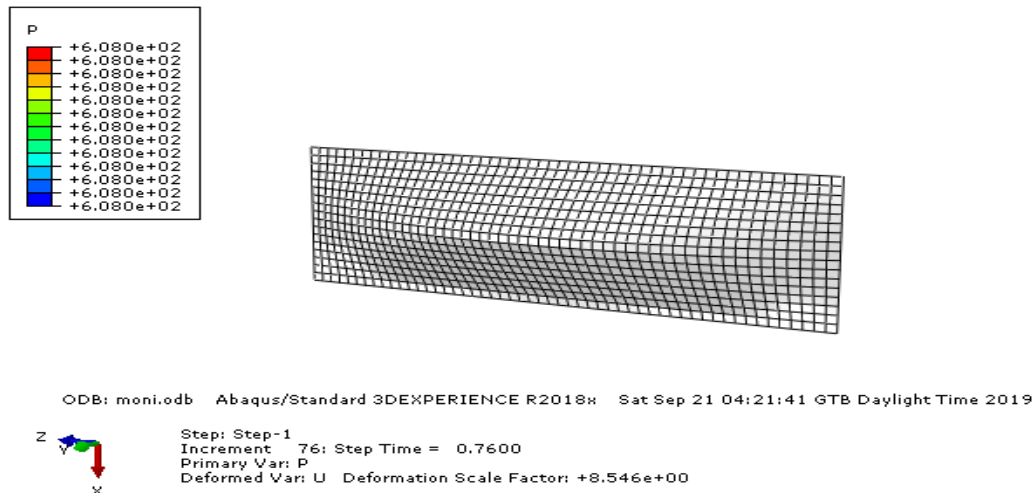
Το κάτω όριο: $p_{low} = 463,164 \text{ kPa}$



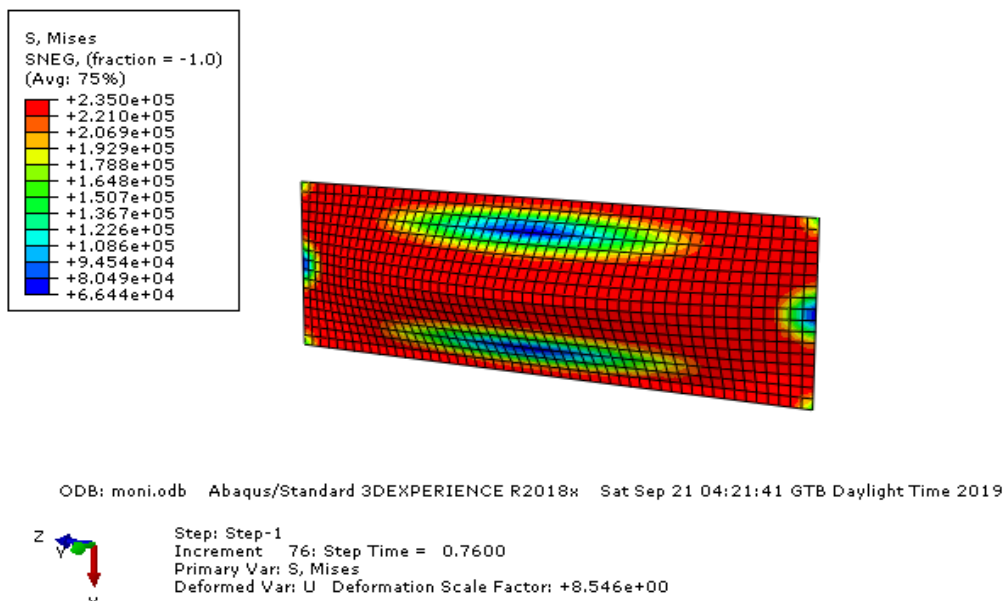
Σχήμα 13. Διάγραμμα P-u μονοτονικής φόρτισης στο μέσο του απλού ελάσματος

Βλέπουμε λοιπόν και από το διάγραμμα τη πίεσης-μετατόπισης στο κέντρο του ελάσματος (εκεί όπου η μετατόπιση είναι η μέγιστη) ότι για τη μονοτονική, στατική φόρτιση για φορτίο 464 kPa φαίνεται να δημιουργείται ο πρώτος σχηματισμός τριών ταυτόχρονων πλαστικοποιημένων ζωνών (στα άκρα και στο κέντρο) ενώ για φορτίο της τάξης 610~640 kPa οι μετατοπίσεις πλέον αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό. Συμπεραίνουμε άρα ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν και από το ABAQUS δίνουν με σχεδόν μηδαμινή απόκλιση, με τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν το φορτίο κατάρρευσης όπως αυτά προέκυψαν και από την αναλυτική επίλυση.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα του ελάσματος για καταπόνηση 608 kPa και αντίστοιχα οι τάσεις Von Mises και μετατοπίσεις.

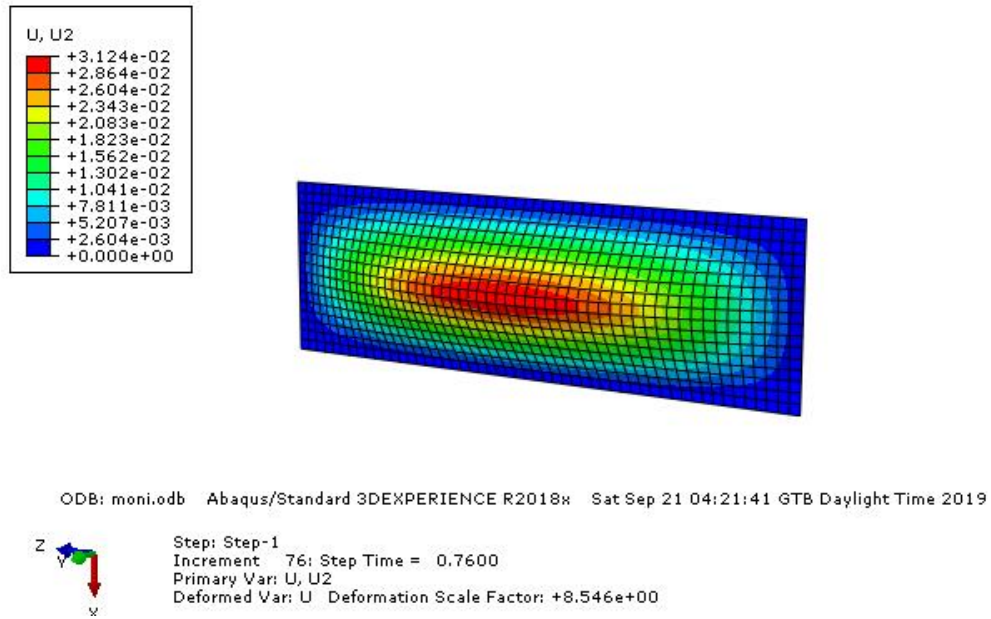


Σχήμα 14. Απεικόνιση του απλού ελάσματος υπό μονοτονική φόρτιση ίση με 608 kPa



Σχήμα 15. Τάσεις Von Mises για φορτίο 608 kPa

Επίσης η τελική μορφή του παραμορφωμένου ελάσματος όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σε μια ευρεία περιοχή γύρω από μια κεντρική οριζόντια γραμμή. Συνεπώς θα μπορούσαμε έτσι να κάνουμε και την εκτίμηση πως σε μεγαλύτερου μεγέθους φόρτιση επιπέδου αστοχίας, αυτή θα ξεκινούσε από τις εν λόγω περιοχές.



Σχήμα 16. Μετατοπίσεις απλού ελάσματος για πίεση 608 kPa

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ομοιόμορφη πίεση σε όλη την επιφάνεια

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ

Μετά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις του απλού ελάσματος, να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του άνω και κάτω φορτίου κατάρρευσης υπολογίσθηκε για το τμήμα του ελάσματος ανάμεσα στα ενισχυτικά, δηλαδή για έλασμα μήκους 2.67 m και πλάτος 0.85m. Αφορούσε λοιπόν τις ακριβείς διαστάσεις ενός ενδιάμεσου τμήματος και με όλα τα χαρακτηριστικά, του πραγματικού φορέα που αποτελεί αντικείμενο της μελέτης μας.

Ο φορέας λοιπόν που μελετάμε αποτελείται από ένα επίπεδο έλασμα ενισχυμένο με 4 διαμήκη ενισχυτικά με εξωτερικές διαστάσεις μήκους 4.25m (την απόσταση δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών κύριων διαμήκων ενισχυτικών) πλάτους 2.67m (την απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικές έδρες νομέων) και πάχους 0.018m. Όσον αφορά τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία ενός τέτοιου ελάσματος, δηλαδή το πάχος του ελάσματος και το εμβαδόν των ενισχυτικών υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό τους αλλά στην παρούσα εργασία οι τιμές αυτές λήφθηκαν από τυπικούς φορείς ναυπηγικών κατασκευών, τόσο για διευκόλυνση όσο και γιατί δεν αποτελούν στόχο αυτής την έρευνας.

Συνοψίζοντας λοιπόν τα παραπάνω, το μοντέλο αποτελείται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απόσταση μεταξύ νομέων: 2.67m
- Απόσταση μεταξύ διαμήκων ενισχυτικών: 0.85m
- Τύπος ενισχυτικού: Ταφ
- Πάχος ελάσματος: 18 mm

Επίσης το συνεργαζόμενο έλασμα της πλάκας στο ενισχυτικό υπολογίζεται ως:

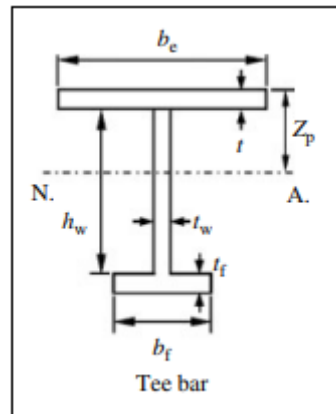
$$b_p: \min\{s, 0.2 \cdot l\} = \min\{0.85, 0.534\} = 0.534m$$

και η επιφάνεια της διατομής του συνδεδεμένου ελάσματος θα είναι

$$b_p \cdot t = 53.4cm \cdot 1.8cm = 96.12cm^2$$

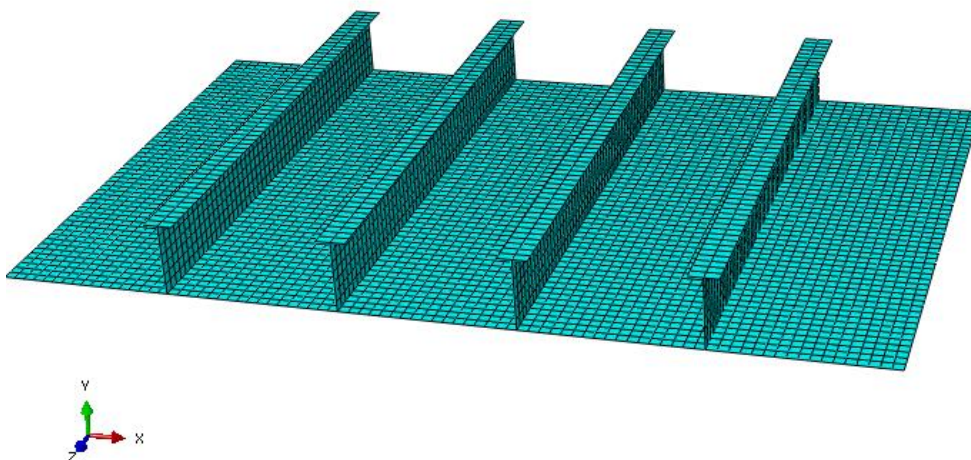
Και τα τυποποιημένα μεγέθη του ενισχυτικού που επιλέχτηκε. Οι συμβολισμοί επεξηγούνται στο διπλανό σχήμα.

t : 18 mm h_w : 350 mm
 b_f : 141mm z_p : 174.95 mm
 t_w : 12 mm A : 160.68 cm²
 t_f : 16 mm

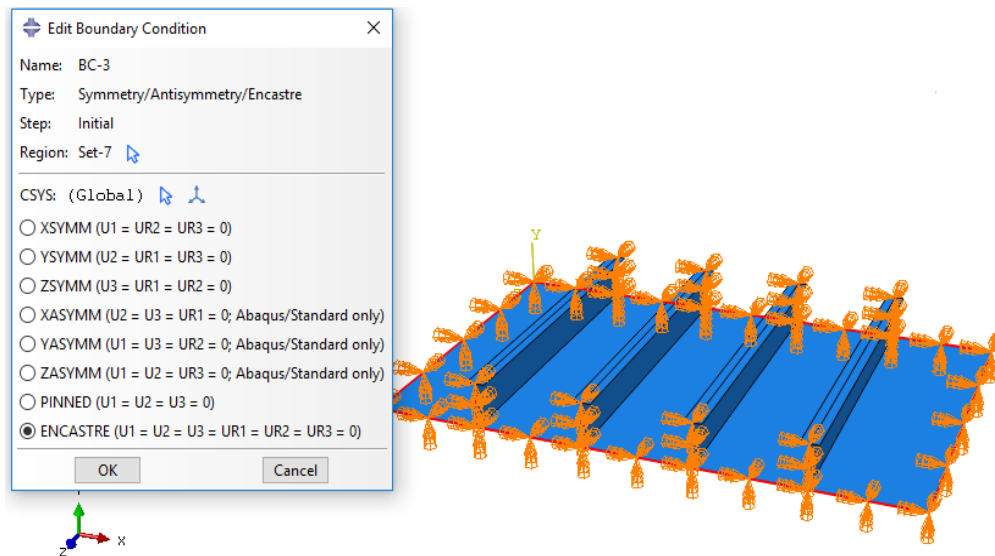


3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Παρακάτω παρατίθεται η προσομοίωση του μοντέλου στο πρόγραμμα ABAQUS. Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μας είναι πακτώσεις όπως φαίνεται και στη εικ.18 που συγκρατούν και τις τέσσερις πλευρές του ελάσματος καθώς και τις ακραίες διατομές των ενισχυτικών. Τα διαγράμματα που παρατίθενται παρουσιάζουν τις κεντρικές κομβικές μετατοπίσεις. Υπενθυμίζεται ότι η κατασκευή μας αποτελείται από ένα επίπεδο έλασμα ενισχυμένο με 4 διαμήκη ενισχυτικά. Τα τμήματα του ελάσματος ανάμεσα στα ενισχυτικά θα τα ονομάζουμε στοιχειώδη ελάσματα (Elementary Plate Panel). Ο κόμβος 2749 είναι ο κεντρικός κόμβος του μεσαίου (κεντρικού) στοιχειώδους ελάσματος.



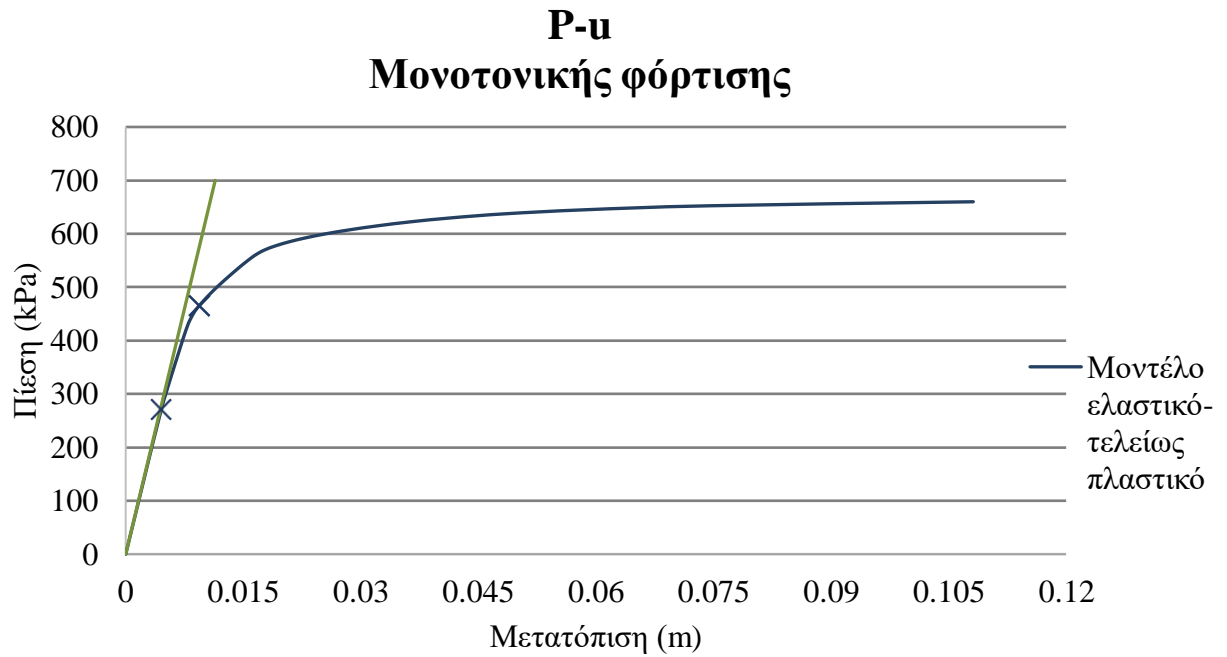
Σχήμα 17. Απεικόνιση της προσομοίωσης του φορέα στο πρόγραμμα



Σχήμα 18. Συνοριακές συνθήκες ελάσματος

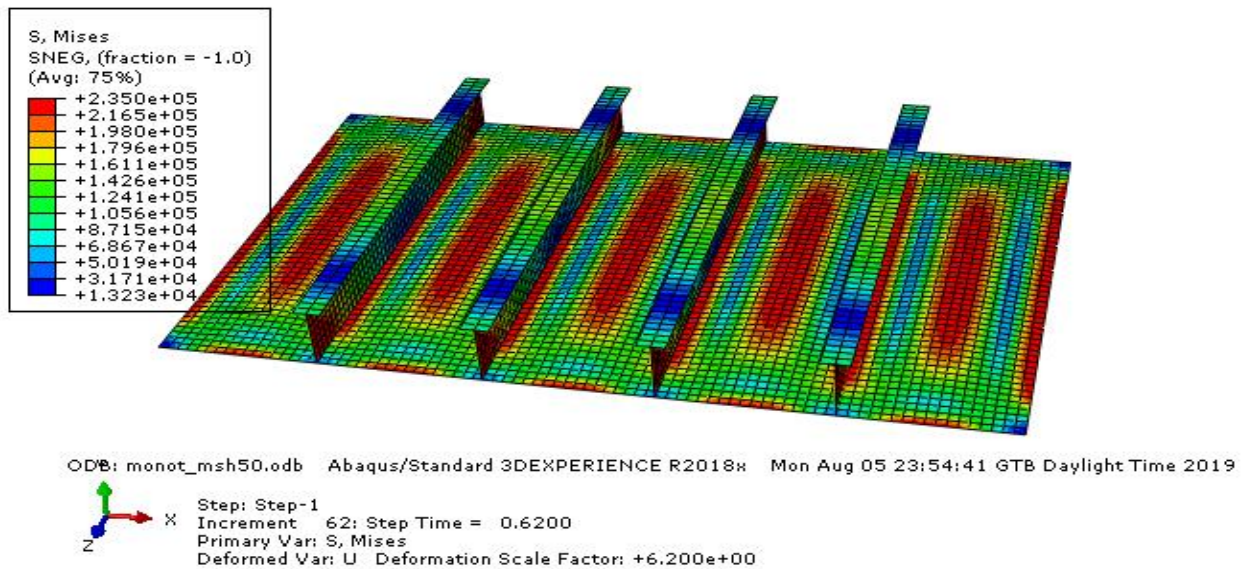
3.3 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Για την στατική φόρτιση επιβάλλεται ομοιόμορφη πίεση σε όλη την επιφάνεια του ελάσματος. Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης -μετατόπισης με τη μέθοδο Riks καθώς όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει τη δυνατότητα να αποδοθεί η σχέση δύναμης μετατόπισης και πέραν των οριακών σημείων. Στην συγκεκριμένη εργασία δεν παρουσιάστηκε πρόβλημα ασταθούς ισορροπίας παρά μόνο για πολύ μεγάλο φορτίο και απόκριση του ελάσματος, πράγμα που δεν παρουσιάστηκε καθώς στο επίπεδο εκείνο της φόρτισης ο φορέας έχει ήδη καταρρεύσει λόγω μεγάλης αύξησης των μετατοπίσεων. Επομένως στο διάγραμμα γίνεται εμφανής η συμπεριφορά της κατασκευής όπου σε παραλληλισμό με την γραμμική-ελαστική ανάλυση φαίνεται το σημείο για το οποίο διαχωρίζονται οι δύο γραμμές άρα τη στιγμή της πρώτης διαρροής. Επίσης φαίνονται κι αυτά τα σημεία για τα οποία η κλίση του διαγράμματος αλλάζει και οι μετατοπίσεις αρχίζουν να αυξάνονται απότομα. Παρακάτω παρατίθενται και εικόνες η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα τη στιγμή που σχηματίζεται η πρώτη μορφή μηχανισμού κατέρρευσης με πλαστικοποιήσεις σε κάθε μέσο και ακμές του κάθε στοιχειώδους ελάσματος.

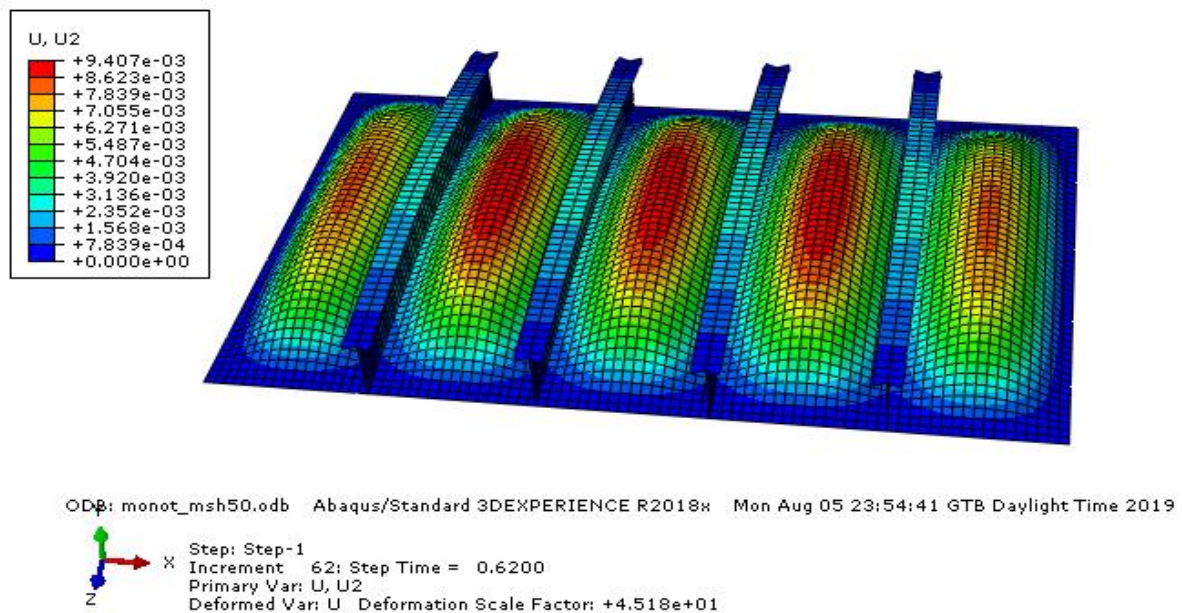


Σχήμα 19. Διάγραμμα μονοτονικής φόρτισης -μετατόπισης
για ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης

Η στιγμή της πρώτης διαρροής όπως έχει σημειωθεί και στο διάγραμμα συμβαίνει για πίεση μεγέθους 270 kPa το οποίο αντιστοιχεί σε μετακίνηση 4.53 mm του μεσαίου κόμβου. Το δεύτερο μαρκαρισμένο σημείο αντιστοιχεί στο σχηματισμό της πρώτης διάδοσης της πλαστικοποίησης πέρα από τις άκρες των στοιχειωδών ελασμάτων και στο μέσον τους. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί σε 465 kPa, μετατόπιση κεντρικού κόμβου 9.36 mm και παρουσιάζεται αναλυτικά με τις ακόλουθες εικόνες.



Σχήμα 20. Τάσεις Von mises για 465 kPa

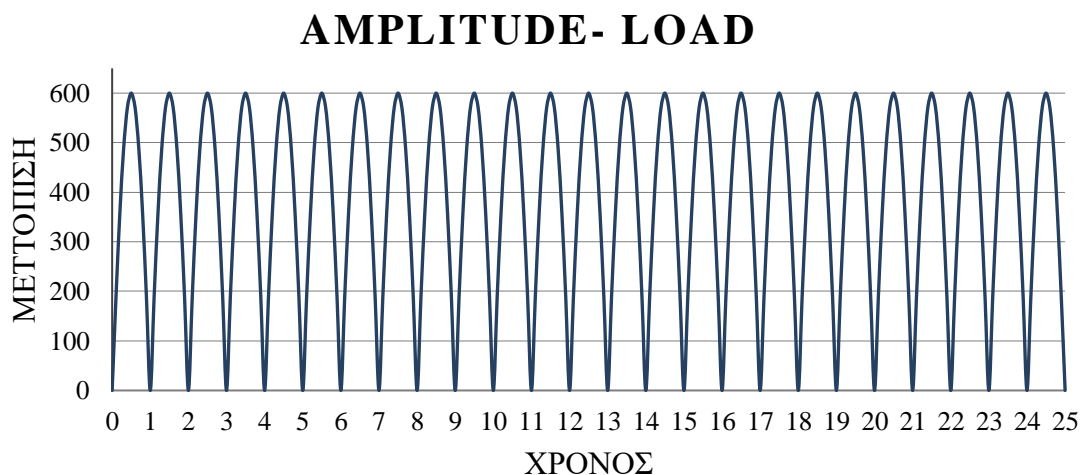


Σχήμα 21. Παραμορφώσεις για $P= 465 \text{ kPa}$

3.4 ΑΝΑΚΥΚΛΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΟΛΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις της ανακυκλικής στατικής φόρτισης παρουσιάζονται για διάφορες τιμές της πίεσης. Η μελέτη της συμπεριφοράς, της διάδοσης της πλαστικότητας κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εξέλιξης της μετατόπισης διερευνώνται με τις δοκιμές φορτίων δημιουργώντας κάθε φορά το διάγραμμα πίεσης μετατόπισης και τελικώς συγκρίνοντας τα μεταξύ τους σε μια προσπάθεια εξαγωγής των κατάλληλων συμπερασμάτων. Η δοκιμές που πραγματοποιούνται είναι ανά 100 ή 50 kPa με βάση την κρίση του φοιτητή από την απόκριση της κάθε φάσης.

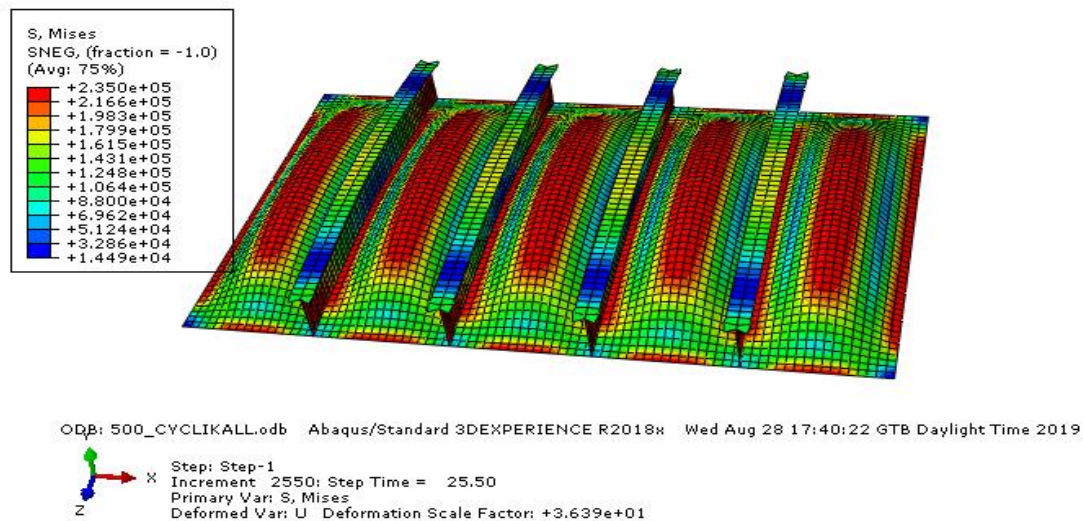
Η ανάλυση σε αυτό το παράδειγμα δείχνει χαρακτηριστικά στοιχεία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Χωρίς να υπάρχει καμία απολύτως μεταβολή στα φορτία που επενεργούν στην πλάκα σε κάθε κύκλο η συμπεριφορά της αλλάζει και οι μετατοπίσεις αυξάνονται σταδιακά, με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε απαγορευτικές τιμές οι οποίες μοιραία οδηγούν σε κατάρρευση. Το παρακάτω διάγραμμα παρατίθεται ενδεικτικά με σκοπό να γίνει απλώς εμφανής η μορφή του amplitude που χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή του φορτίου. Αποτελεί παράδειγμα ενός φορτίου 600 kPa που επιβλήθηκε για 25 κύκλους φόρτισης. Όπως θα φανεί στη συνέχεια οι επίσημες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για 50 κύκλους.



Σχήμα 22. Απεικόνιση μορφής φορτίου μέσω Amplitude

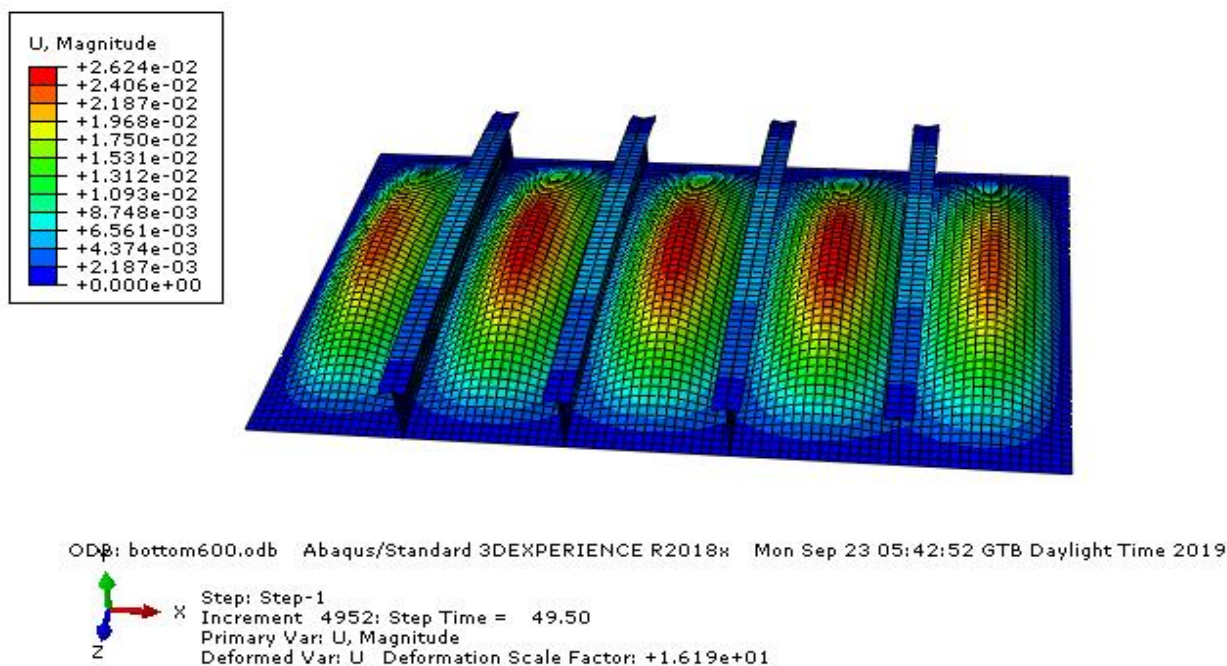
3.4.1 Πίεση μεγέθους 500

Το πρώτο φορτίο για το οποίο μελετήθηκε αυτή η συμπεριφορά είναι των 500 kPa, Το μοντέλο όπως φάνηκε και από την μονοτονική φόρτιση στα 500 kPa έχει ήδη σχηματίσει πλαστικές ζώνες και από κει και πέρα ξεκινάνε οι μεγάλες μετατοπίσεις.

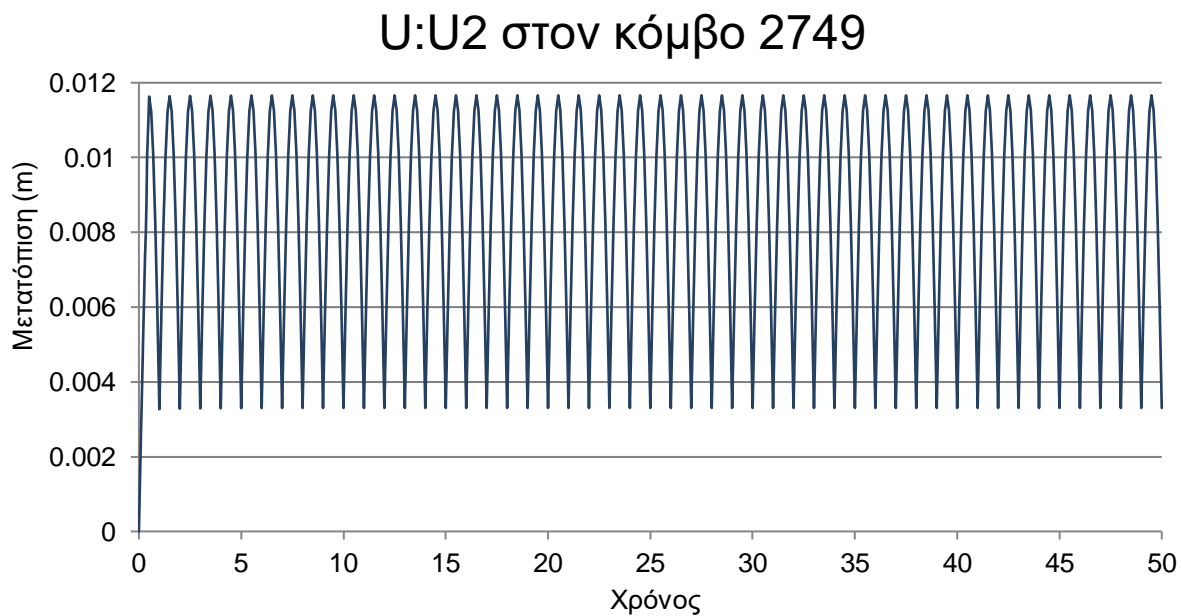


Σχήμα 23. Τάσεις Von mises στους 25 κύκλους για 500 kPa

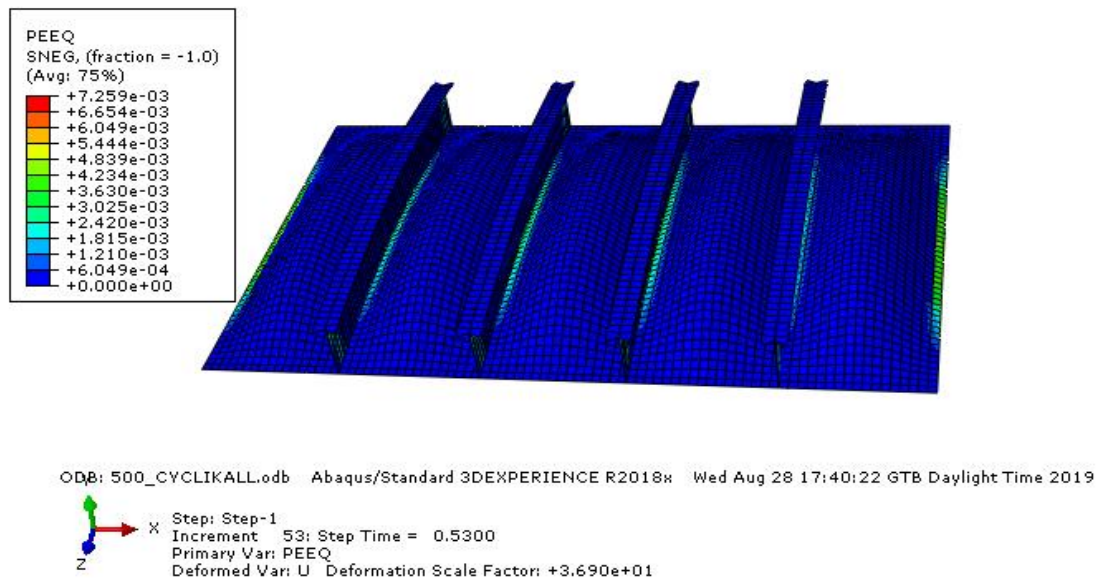
Παρακάτω παρατίθενται διάγραμμα μετατοπίσεων στο κεντρικό κόμβο (N:2749) του μεσαίου ελάσματος καθώς εκεί εμφανίζεται η μέγιστη τιμή όπως επίσης και διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης συναρτήσει χρόνου σε σημείο της συγκόλλησης του ελάσματος με το ενισχυτικό.



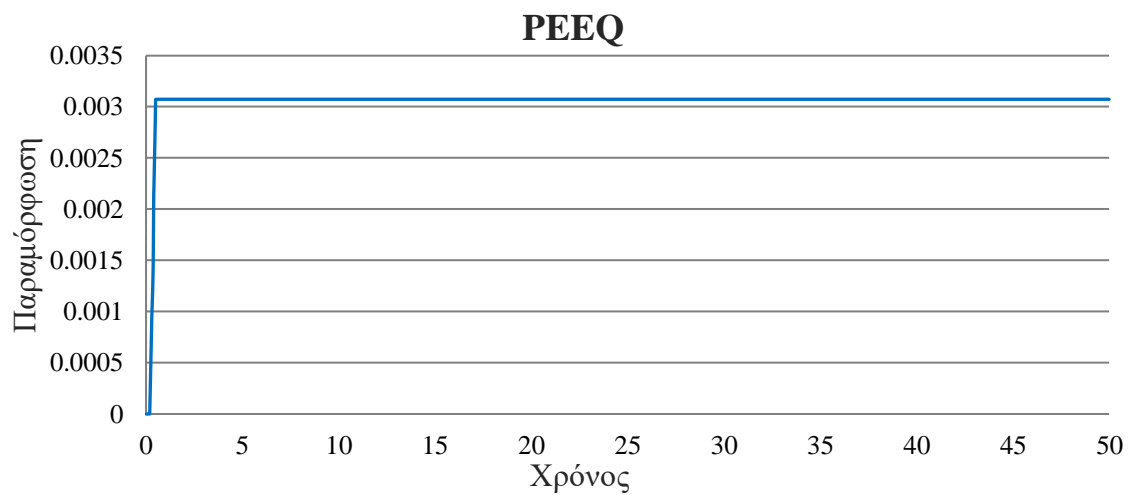
Σχήμα 24. Μετατοπίσεις στο πέρας των 50 κύκλων



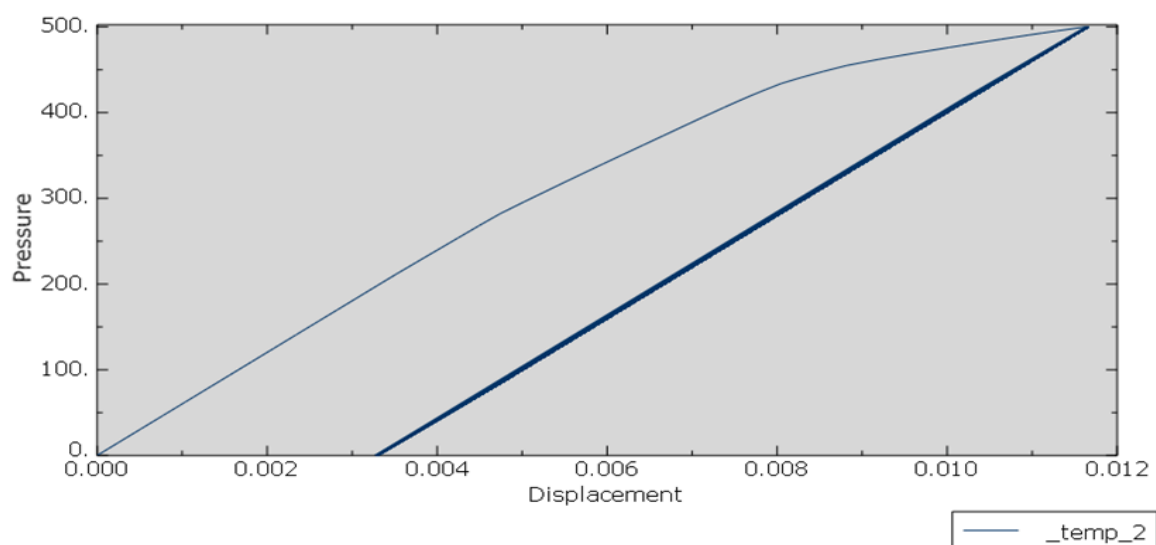
Σχήμα 25. Μετατόπιση κατακόρυφη (U:U2) στο κόμβο 2749



Σχήμα 26. Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση των στοιχείων της κατασκευής



Σχήμα 27. Διάγραμμα Ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης

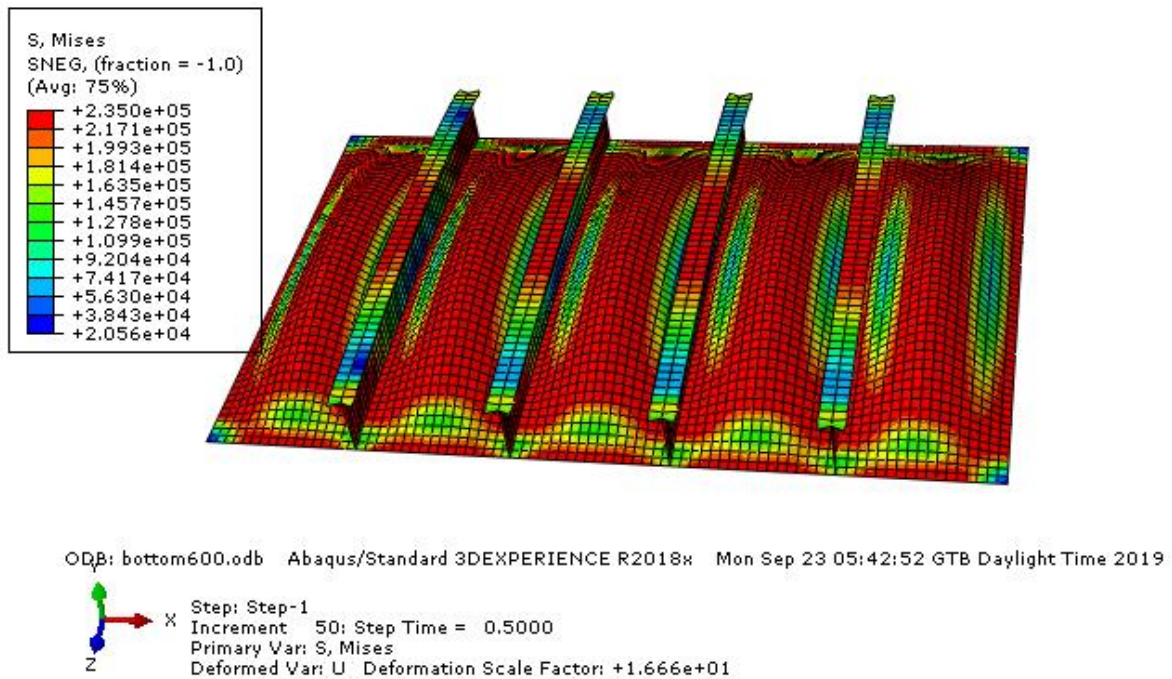


Σχήμα 28. Τελικό διάγραμμα πίεσης – μετατόπισης για 500 kPa

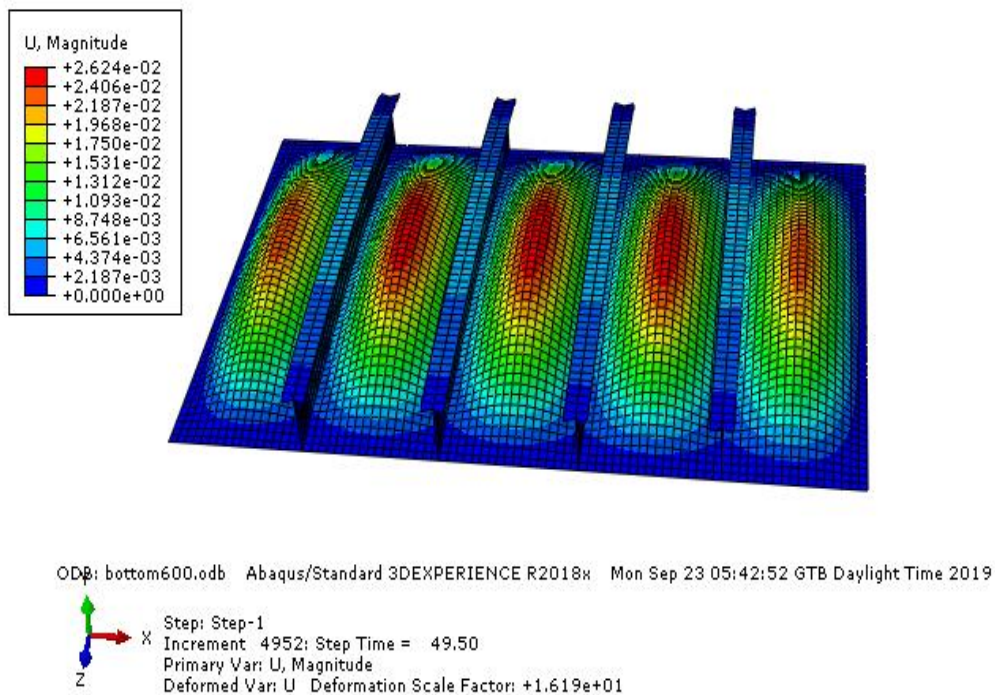
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τη τιμή των 500 kPa δείχνουν πως σε αυτή τη φάση ο φορέας μου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ανακύκλωση και το επίπεδο φόρτισης. Οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές και από τον πρώτο κύκλο δεν "δίνει" άλλες. Το ίδιο συμβαίνει και με τις μετατοπίσεις όπου κατευθείαν σταθεροποιούνται.

3.4.2 Πίεση μεγέθους 600 kPa

Αντίστοιχα με τη προηγούμενη περίπτωση έτσι κι εδώ παρουσιάζονται οι εικόνες των τάσεων των μετατοπίσεων και της πλαστικής παραμόρφωσης στα σημεία και σε χρονικές στιγμές του μεγαλύτερου ενδιαφέροντος.

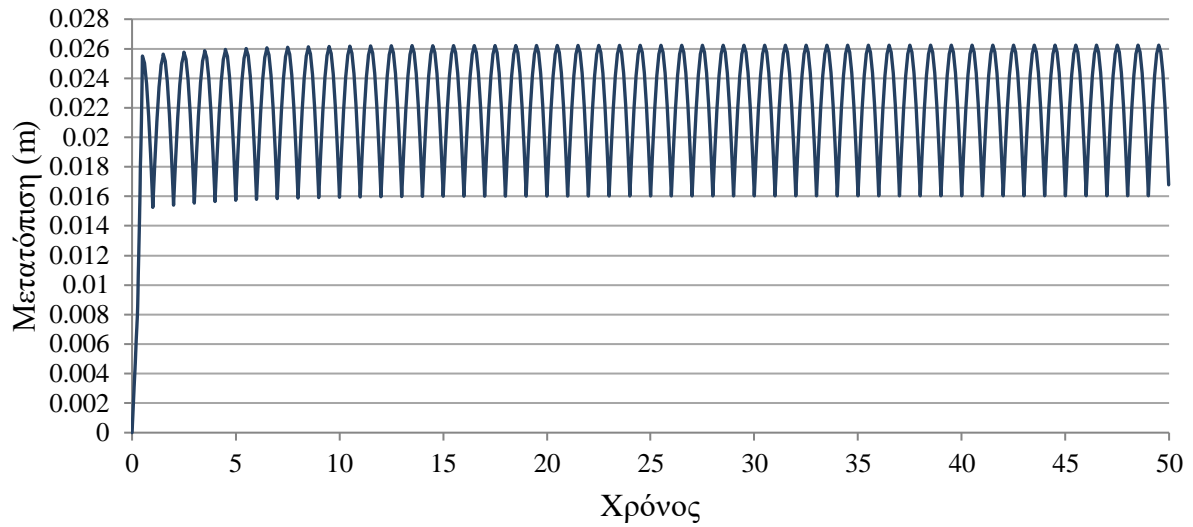


Σχήμα 29. Απεικόνιση τάσης Von Mises

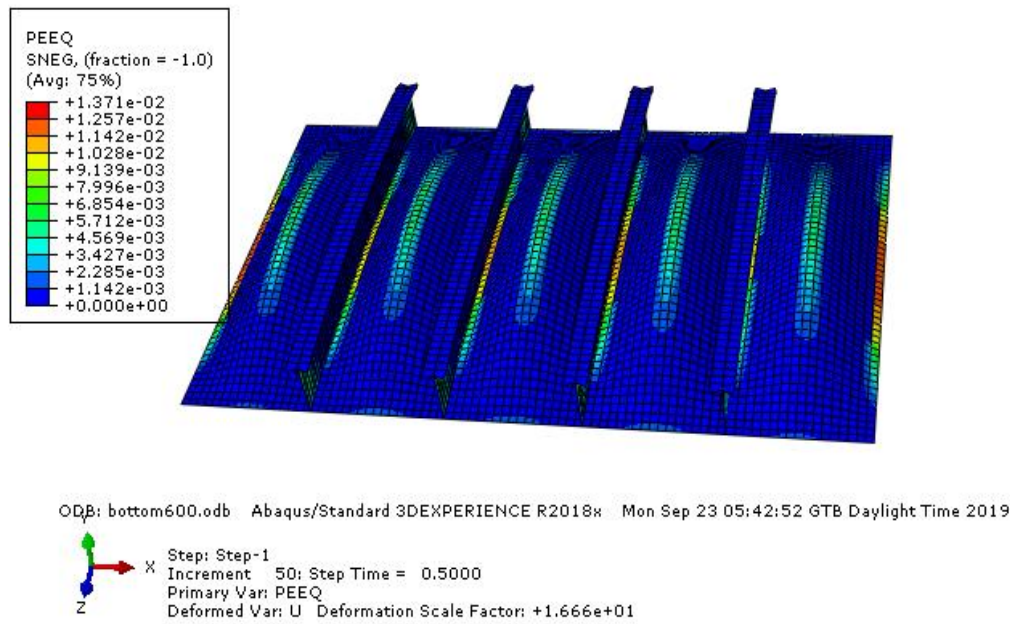


Σχήμα 30. Απεικόνιση μετατοπίσεων για 600 kPa

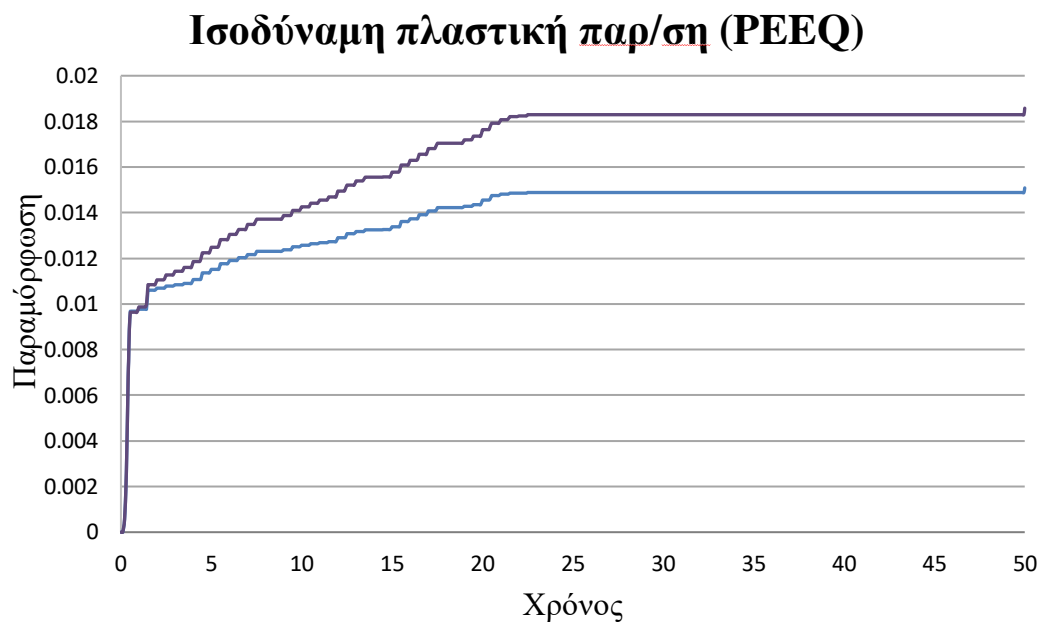
U:U2 στο κόμβο 2749



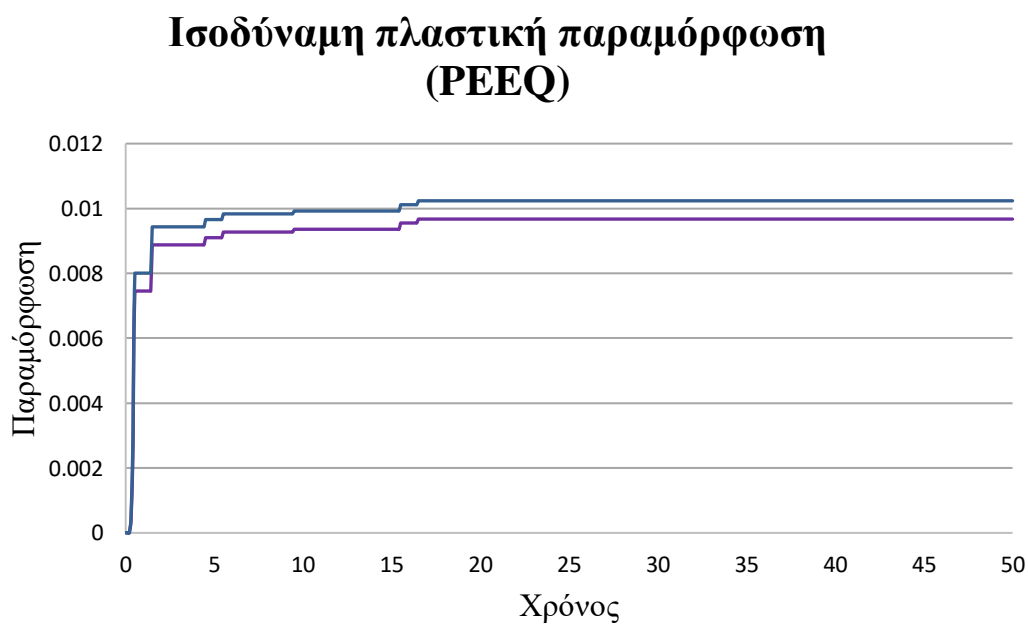
Σχήμα 31. Διάγραμμα μετατοπίσεων στο μεσαίο κόμβο



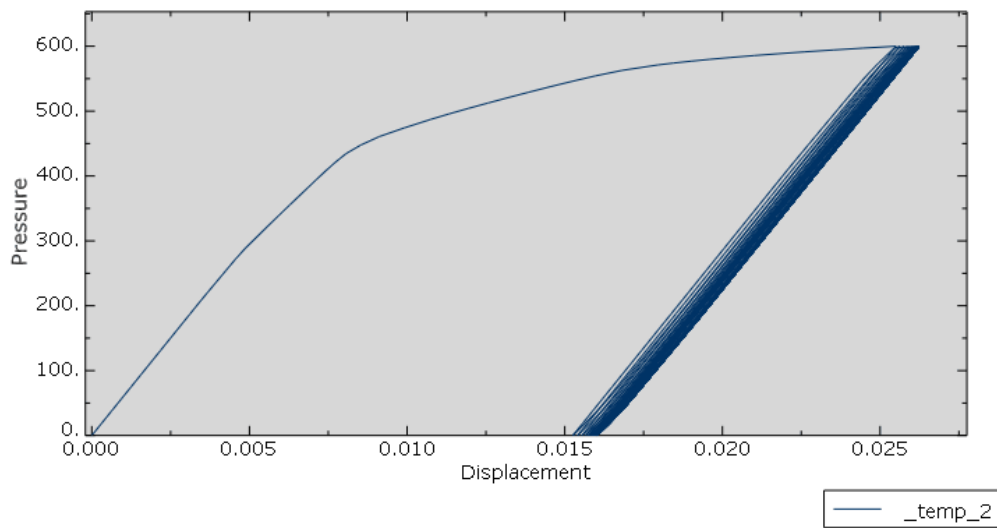
Σχήμα 32. Απεικόνιση ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης



Σχήμα 33. Διάγραμμα ισοδύναμης παραμόρφωσης στην ένωση ελάσματος – ενισχυτικού



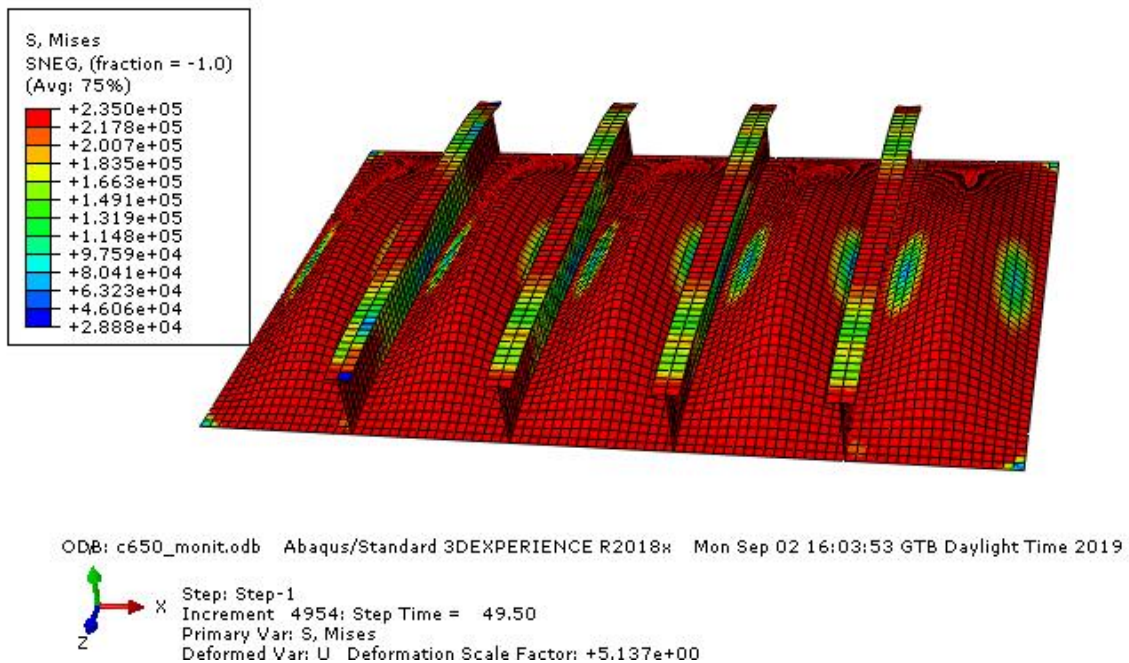
Σχήμα 34. Διάγραμμα ισοδύναμης παραμόρφωσης στο κέντρο του ελάσματος



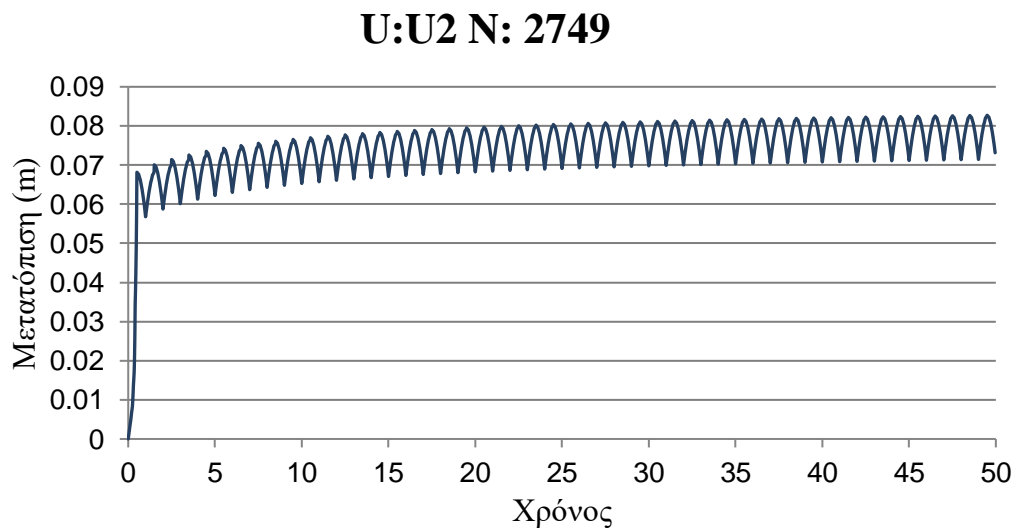
Σχήμα 35. Διάγραμμα πίεσης μετατόπισης για ανακύκλωση 600 kPa

Στο επίπεδο των 600 kPa βλέπουμε πως οι πλαστικές τάσεις αρχίζουν να εξαπλώνονται σε σημαντικό κομμάτι του φορέα και όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των πλαστικών παραμορφώσεων τουλάχιστον στην περιοχή της συγκόλλησης γίνεται έντονη η αύξηση τους μέχρι και το πέρας των μισών περίπου κύκλων και μετά σταθεροποιείται. Το ίδιο συμβαίνει και με τις μετακινήσεις, το οποίο πρώτον είναι ένα καλό δείγμα συμπεριφοράς και δεύτερον δείχνει πως το φορτίο αυτό σίγουρα δεν αποτελεί οριακό φορτίο για το φορέα, αλλά μοιάζει να πλησιάζει σιγά σιγά σε εκείνο.

3.4.3 Πίεση μεγέθους 650 kPa

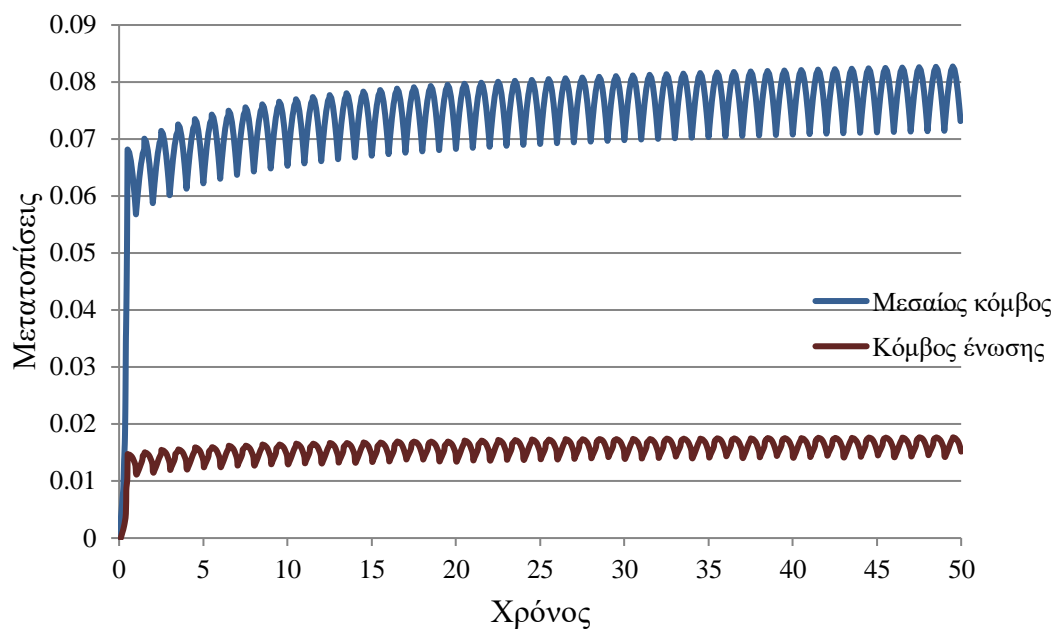


Σχήμα 36. Τάσεις Von Mises για 650 kPa στο 45,5 κύκλο

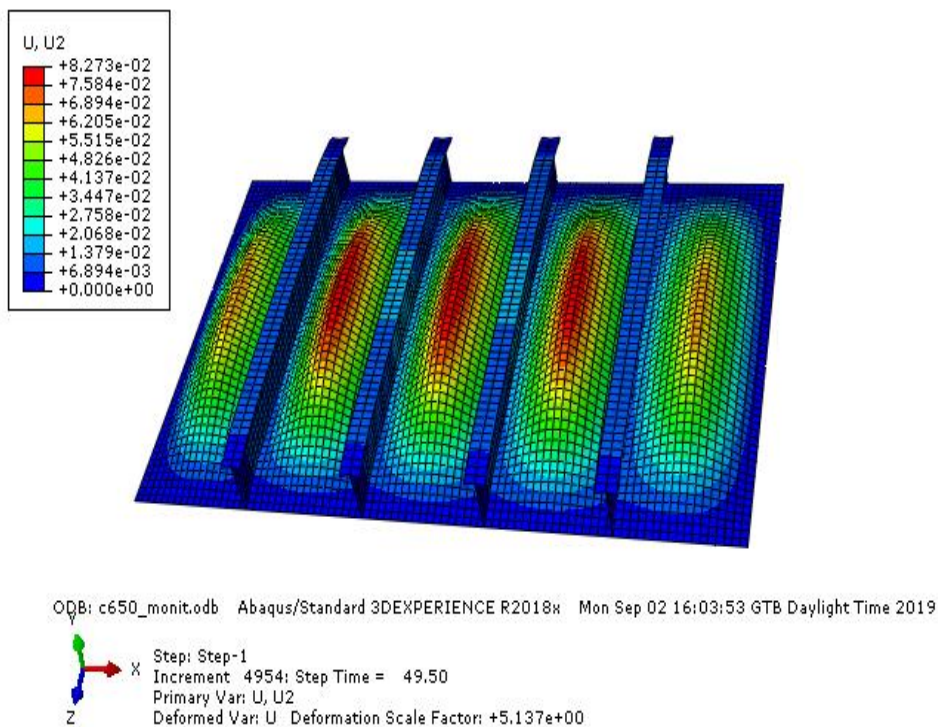


Σχήμα 37. Τελικές κομβικές μετατοπίσεις

U:U2

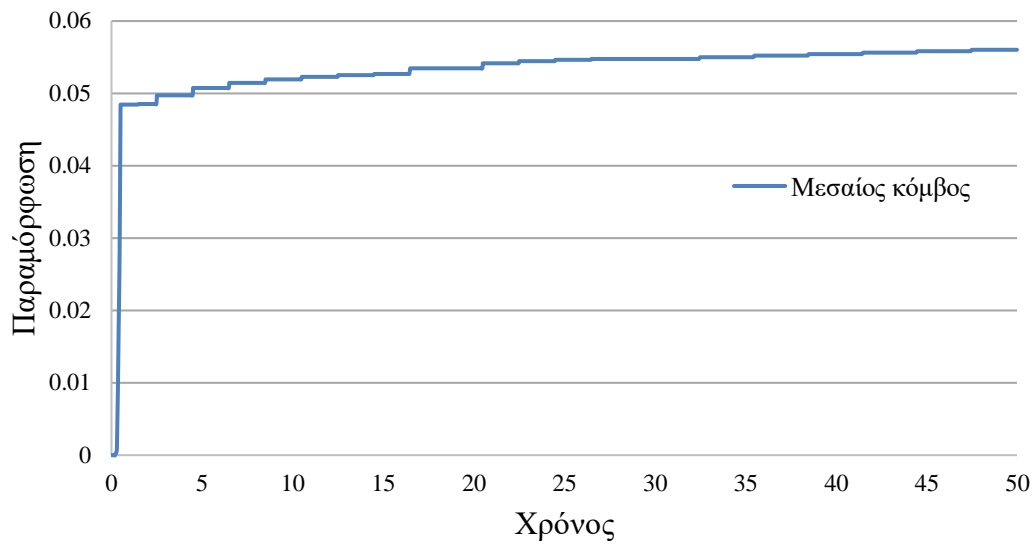


Σχήμα 38. Μετατοπίσεις στο κέντρο και στη συγκόλληση

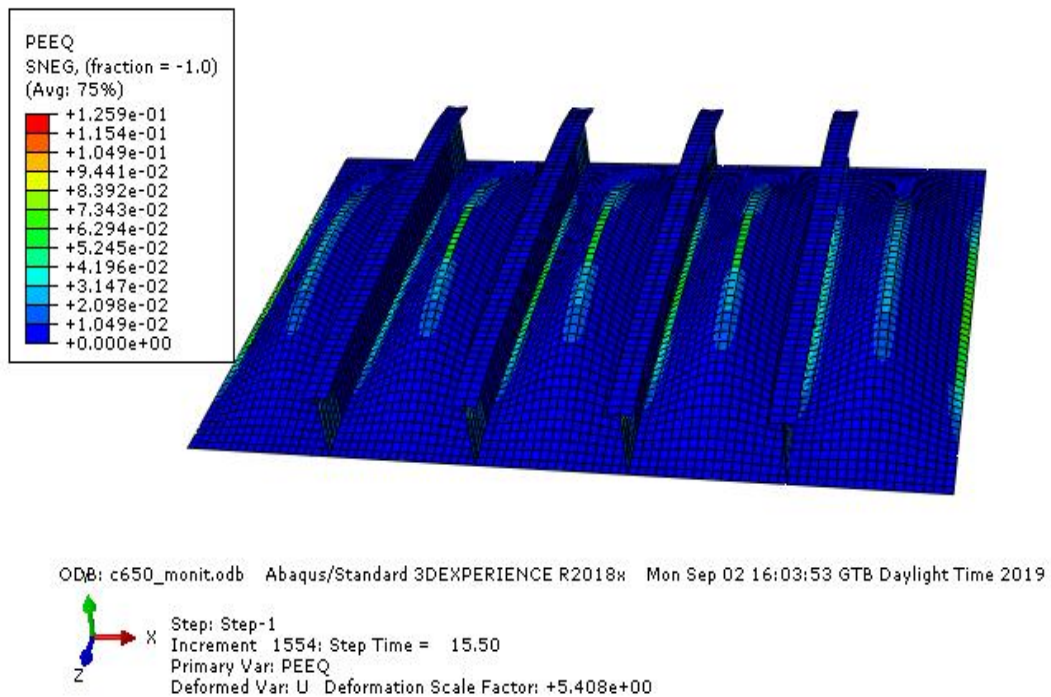


Σχήμα 39. Μορφή μετατοπίσεων για $T=45,5$

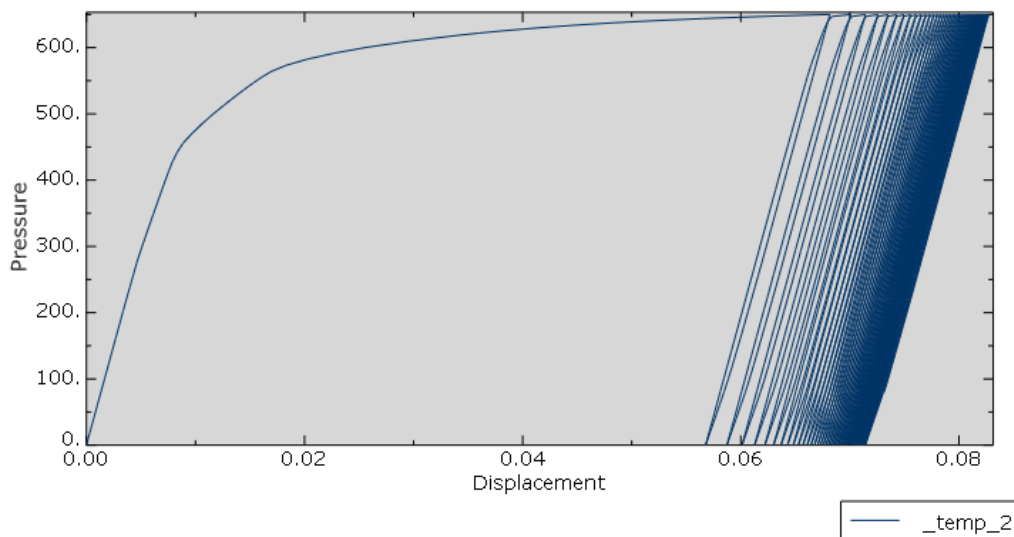
Πλαστική ισοδύναμη παρ/ση-PEEQ



Σχήμα 40. Διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για 650 kPa



Σχήμα 41. Απεικόνιση ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για 650 kPa



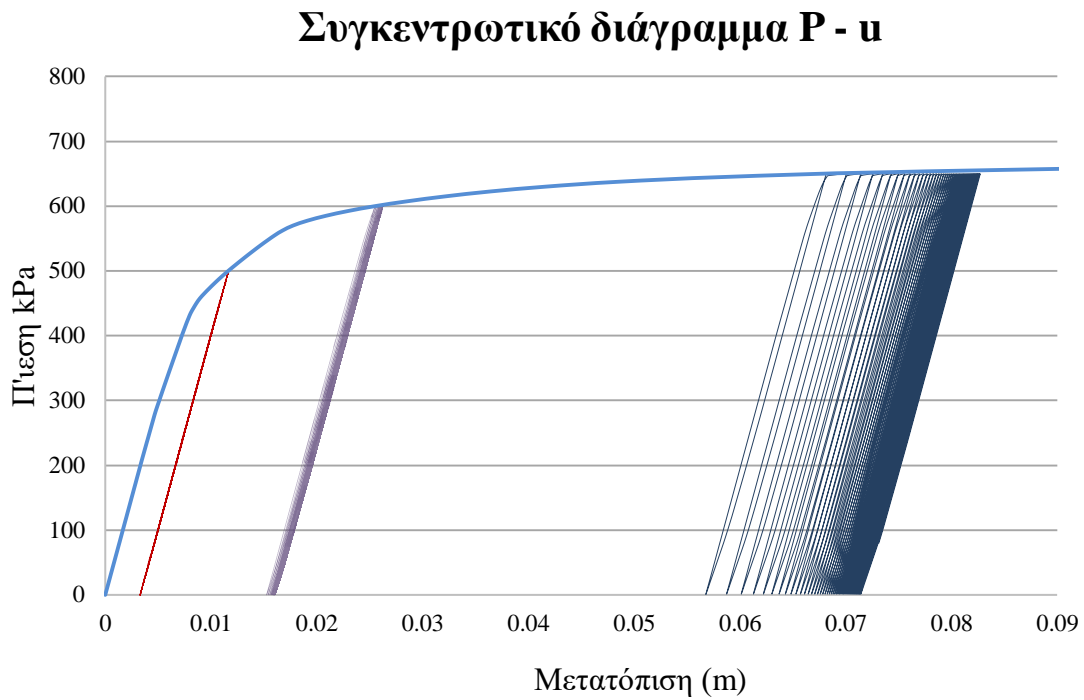
Σχήμα 42. Διάγραμμα πίεσης παραμόρφωσης για 650 kPa

3.4.4 Σύγκριση διαγραμμάτων P-U

Όπως διαπιστώνεται από τα διαγράμματα τα συγκεντρωτικά που ακολουθούν καταλαβαίνουμε ότι, για φορτίο της τάξης 650 kPa ήδη οι μόνιμες μετατοπίσεις έχουν φτάσει σε απαγορευτικές τιμές.

Επίσης βλέπουμε πως η αύξηση της αρχικής μετατόπισης συνεχίζει σε όλη τη διάρκεια των 50 κύκλων όπως και οι παραμορφώσεις. Η διαπίστωση πως το μέγεθος των μετατοπίσεων έχει φτάσει σε ένα απαγορευτικό επίπεδο πηγάζει από το γεγονός πως ξεπέρασε κατά πολύ το διπλάσιο του πάχους του ελάσματος ($\gg 2t$). Μια σύγκριση η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει και κριτήριο για τη εύρεση του φορτίου που αναζητάμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το φορτίο αυτό αποτελεί το φορτίο προσαρμογής της κατασκευής ή το εν λόγω φορτίο είναι ανάμεσα στα 2 τελευταία.

Σύγκριση αποτελεσμάτων κάθε φορτίου ανακύκλησης.



Σχήμα 43. Συγκεντρωτικό διάγραμμα P-u για φόρτιση σε όλη την επιφάνεια.

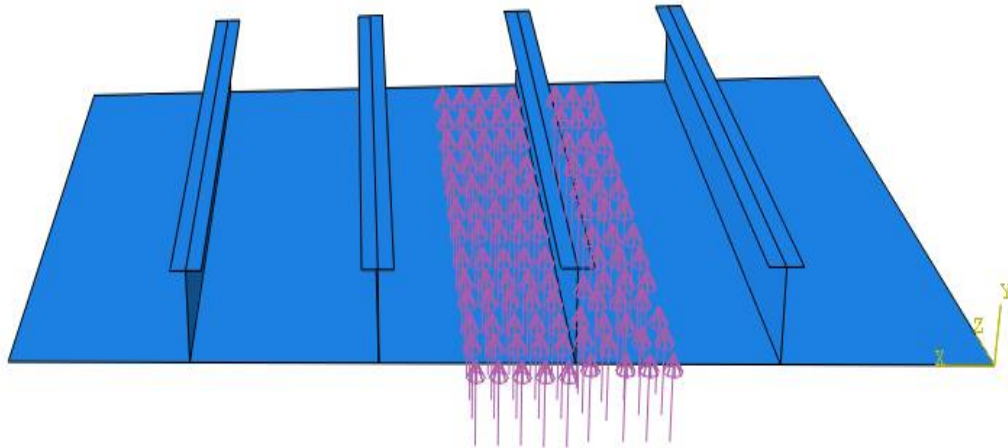
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Φορτίο πάγου

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΑΓΟΥ

Μια άλλη περίπτωση που αποτέλεσε σημείο ενδιαφέροντος είναι αυτή της προσομοίωσης ενός φορτίου που θα αντιπροσωπεύει την πρόσκρουση της μεταλλικής κατασκευής σε πάγο. Με μια απλοποιημένη προσομοίωση και -ομοίως με τη προηγούμενη ανάλυση- χρήση στατικής φόρτισης επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με σκοπό της εξαγωγή αντίστοιχων συμπερασμάτων και σύγκρισης ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η μορφή και το εύρος του φορτίου που επιλέχθηκε για την περίπτωση που μόλις περιγράφηκε.



Σχήμα 44. Προσομοίωση της μορφής του φορτίου πάγου.

Τοπική πίεση πάγου

Όλα τα σκάφη πρέπει να αντέχουν την τοπική πίεση πάγου όπως ορίζεται για τις διάφορες κλάσεις πάγου και όπως εφαρμόζονται στις διάφορες περιοχές ενισχυμένες με πάγο. Η πίεση σχεδιασμού πρέπει να εφαρμόζεται σε μια αντίστοιχη επιφάνεια επαφής αντικατοπτρίζοντας το είδος του εν λόγω φορτίου.

Η βασική πίεση πάγου θεωρείται γενικά ως:

$$p_0 = 1\,000\,FA\,\sigma_{ice} \text{ (kN / m}^2\text{)}$$

FA : συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή που ενισχύεται από πάγο

= 1,0 για την περιοχή του τόξου και του στελέχους γενικά.

= 0,6 για την περιοχή της μέσης θάλασσας γενικά

= 0,5 για την περιοχή μεσαίου πλοίου εάν το πλάτος του σκάφους στην περιοχή του τόξου είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του πλοίου στην περιοχή της μέσης

= 0,20 για την περιοχή βυθού των πλοίων με παγοθραυστικό ή POLAR

= 0,10 για την περιοχή βυθού των σκαφών μόνο με ICE

= 0,6 για την πρύμνη γενικά

= 0,8 για την πρύμνη σε πλοία με ταξινόμηση κατά κατηγορίας

= 1,0 για την πρύμνη σε πλοία με κλάση Icebreaker ή POLAR και 0,8 για πλοία με ICE

σημειογραφία, εφοδιασμένες με μονάδες πρόωσης ή προωστικής κίνησης και σχεδιασμένες για συνεχή λειτουργία πίσω.

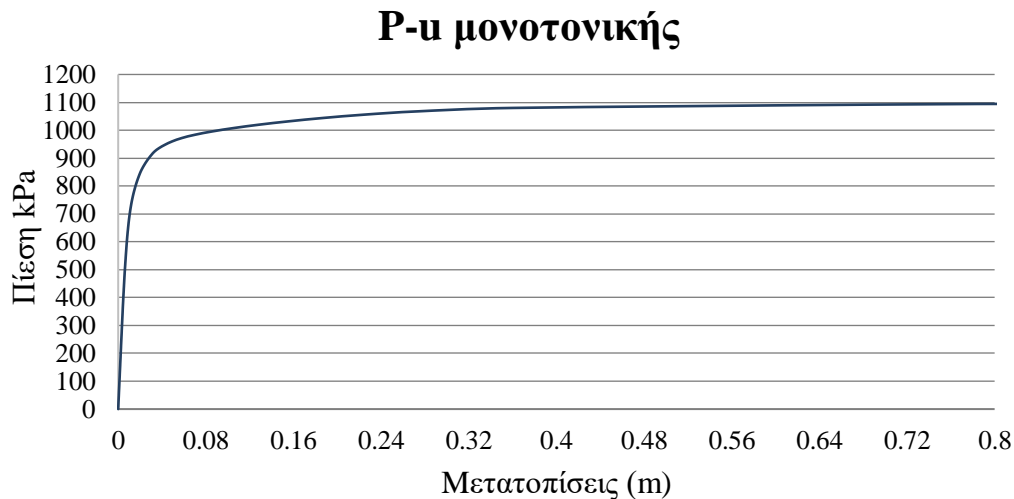
Στον πίνακα φαίνεται ανάλογα με το τύπο του πλοίου και πάγου τις τιμές που μπορούν να πάρουν τα πλάτη και η ονομαστική δύναμη του πάγου.

Table A1 Ice conditions				
<i>Class notation</i>	<i>Type of ice encountered</i>	<i>Nominal ice strength σ_{ice} (N/mm²)</i>	<i>Nominal ice thickness h_{ice} (m)</i>	<i>Limiting impact conditions</i>
ICE-05 ICE-10 ICE-15	Winter ice with pressure ridges	4.2 5.6 7.0	0.5 1.0 1.5	No ramming anticipated
POLAR-10 POLAR-20 POLAR-30	Winter ice with pressure ridges and multi-year ice-floes and glacial ice inclusions	7.0 8.5 10.0	1.0 2.0 3.0	Occasional ramming
Icebreaker	As above	As above	As above	Repeated ramming

Το πλάτος επιλέχθηκε περίπου 1 m και η προσομοίωση του φαίνεται στη προηγούμενη εικόνα.

4.2 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Ο αλγόριθμος επίλυσης και η μέθοδος ανάλυσης παρέμειναν οι ίδιοι. Δεν διαφοροποιήθηκαν επίσης ούτε συνοριακές συνθήκες, πλέγμα ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο της αρχικής μοντελοποίησης.



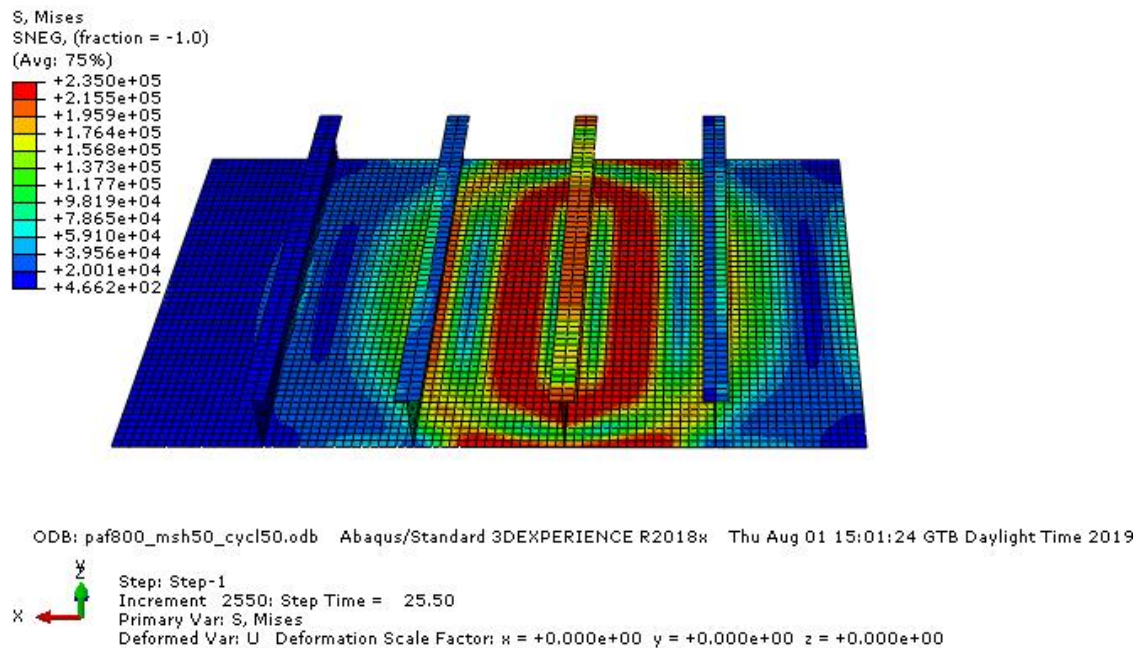
Σχήμα 45. Μονοτονική φόρτιση για πίεση πάγου

Βλέπουμε πως σε σχέση με το ομοιόμορφο παντού φορτίο, αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για τις οποίες μεγαλώνουν οι μετατοπίσεις. Η ανακύκλωση θα δείξει το επίπεδο των φορτίων που είναι ικανά να προκαλέσουν ζημιά στη κατασκευή και παρουσιάζονται παρακάτω.

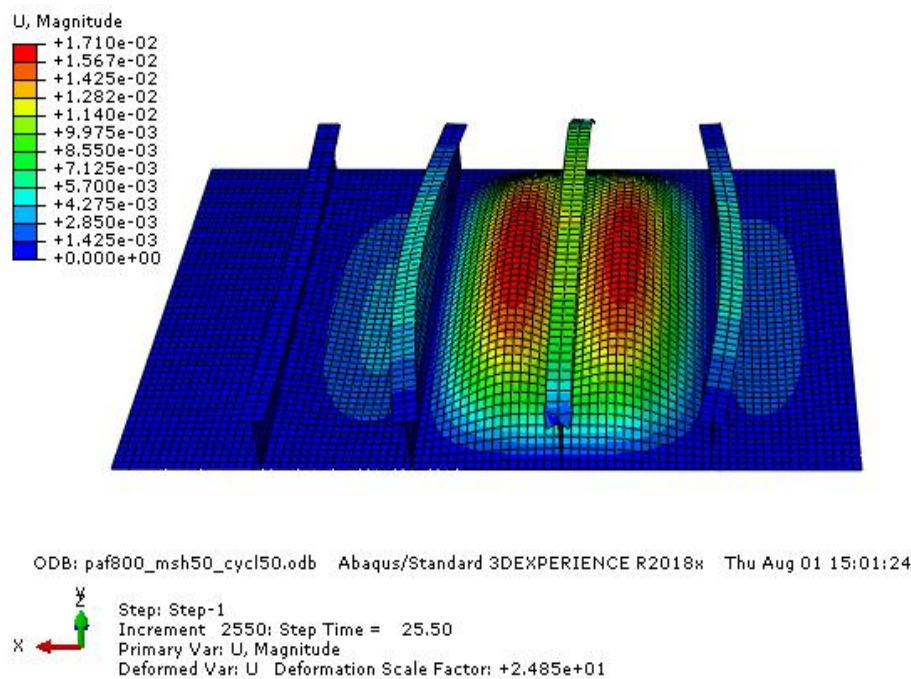
4.3 ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΑΓΟΥ

4.3.1 Πίεση μεγέθους 800 kPa

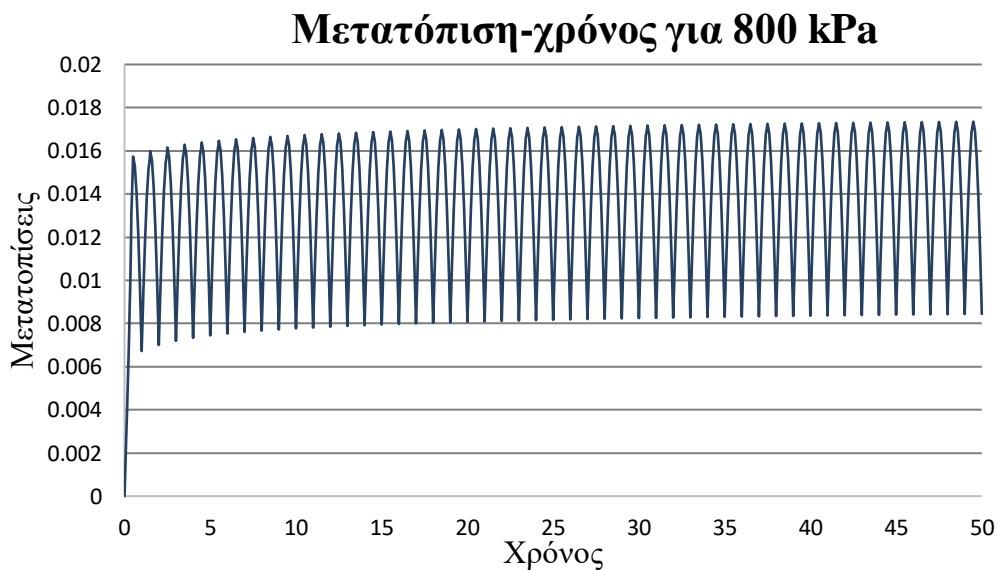
Το πρώτο φορτίο που επιλέχθηκε να διερευνηθεί είναι 800 kPa. Τη στιγμή όπου το φορτίο μεγιστοποιείται, δηλαδή στη κορυφή του κάθε κύκλου, βλέπουμε την κατανομή της πλαστικοποίησης να σχηματίζει τη παρακάτω μορφή.



Σχήμα 46. Απεικόνιση τάσεων Von Mises

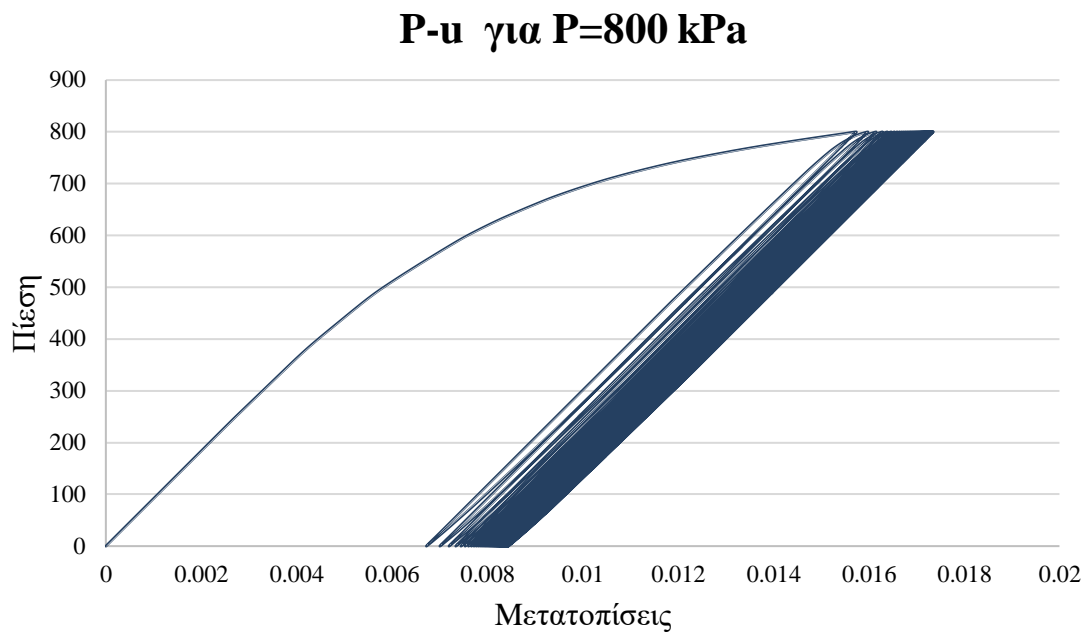


Σχήμα 47. Απεικόνιση μετακινήσεων για 800 kPa



Σχήμα 48. Διάγραμμα μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου

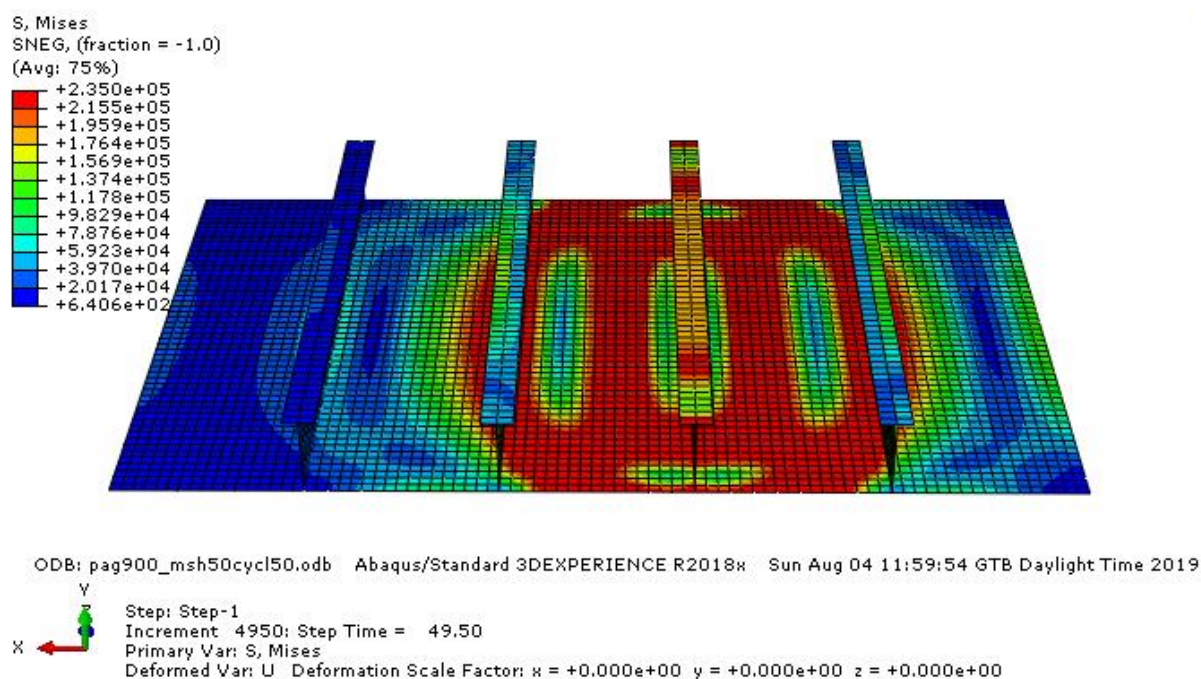
Το διάγραμμα πίεσης μετατόπισης στο κόμβο που εμπεριέχεται στο πεδίο της φόρτισης και εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζεται παρακάτω.



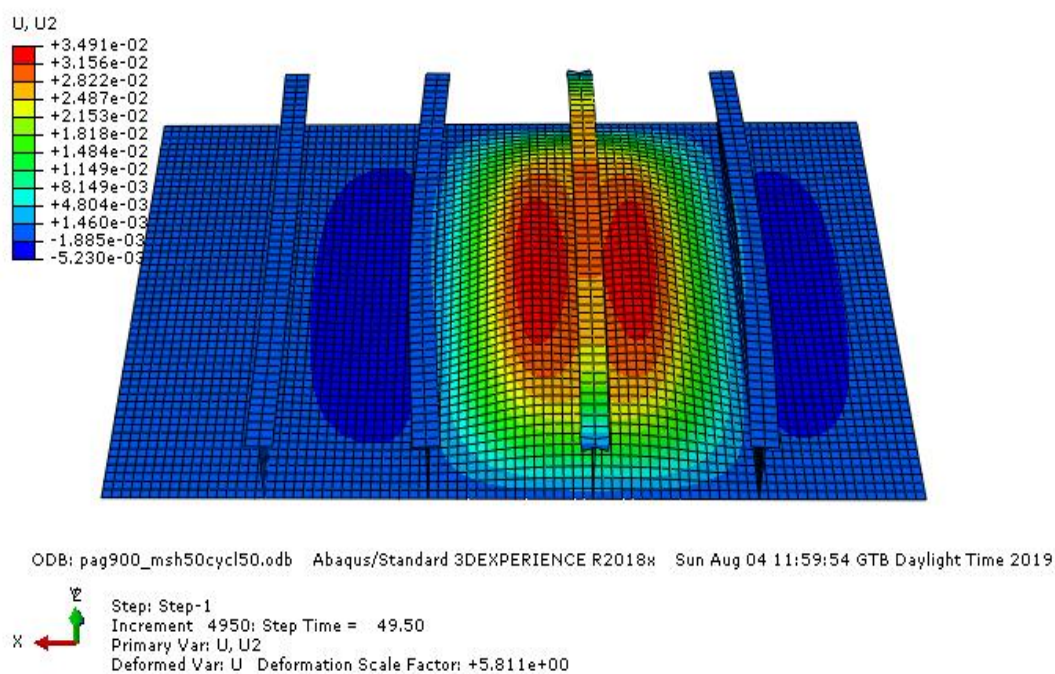
Σχήμα 49. Διάγραμμα $P-u$ για $P=800\text{kPa}$

Για το φορτίο των 800 kPa δεν εξήγαμε καν φορτία παραμορφώσεων γιατί οι παραμορφώσεις ήταν πολύ μικρές και όπως φαίνεται και από τα άλλα μεγέθη, μετατοπίσεις και τάσεις, είτε είναι σχετικά μικρά είτε στην 1^η περίπτωση σταθεροποιούνται.

4.3.2. Πίεση μεγέθους 900 kPa

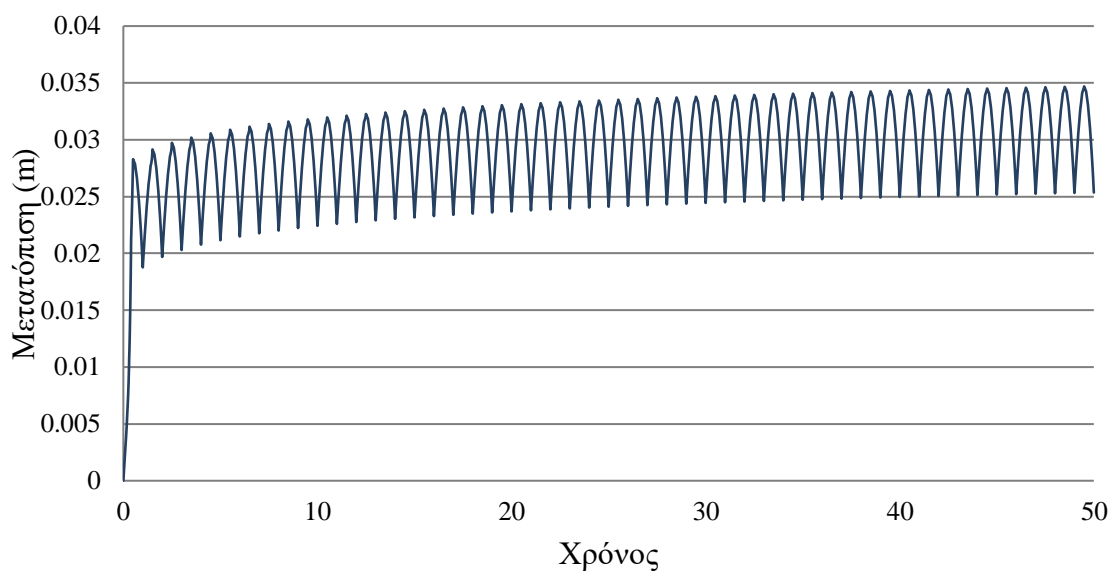


Σχήμα 50. Απεικόνιση τάσεων Von Mises



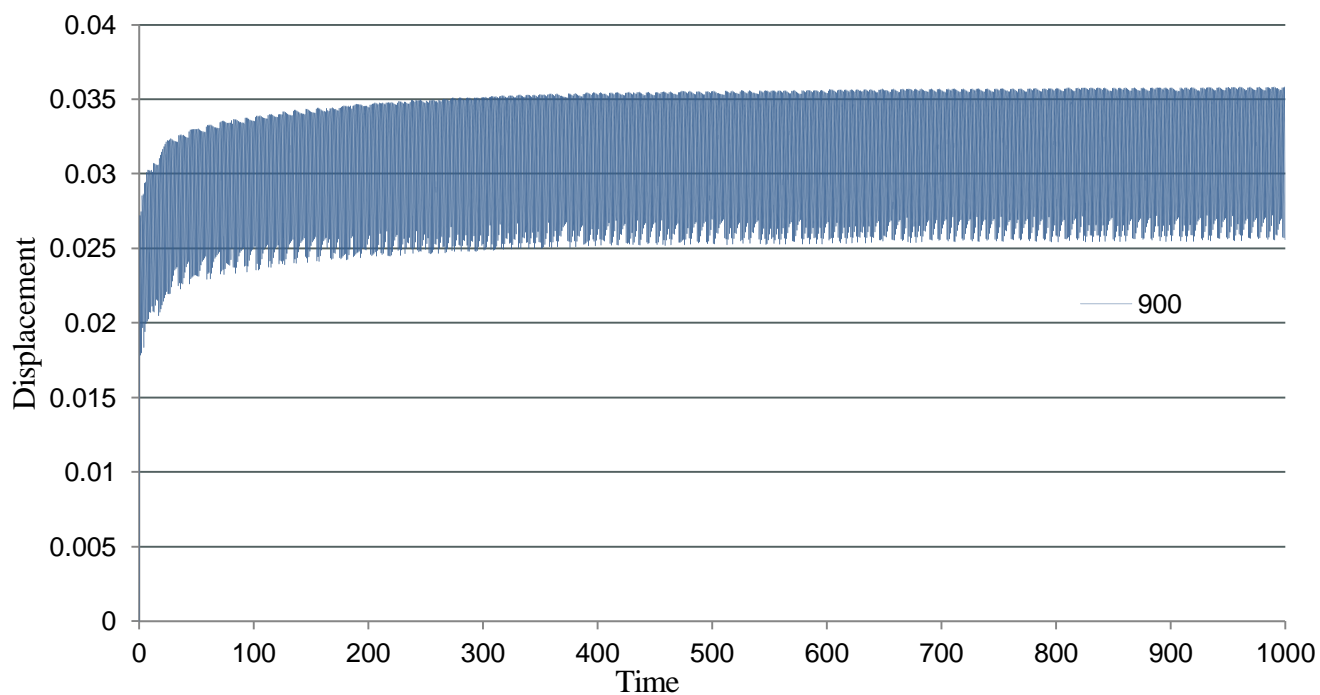
Σχήμα 51. Απεικόνιση μετατοπίσεων

Μετατόπιση στο κέντρο



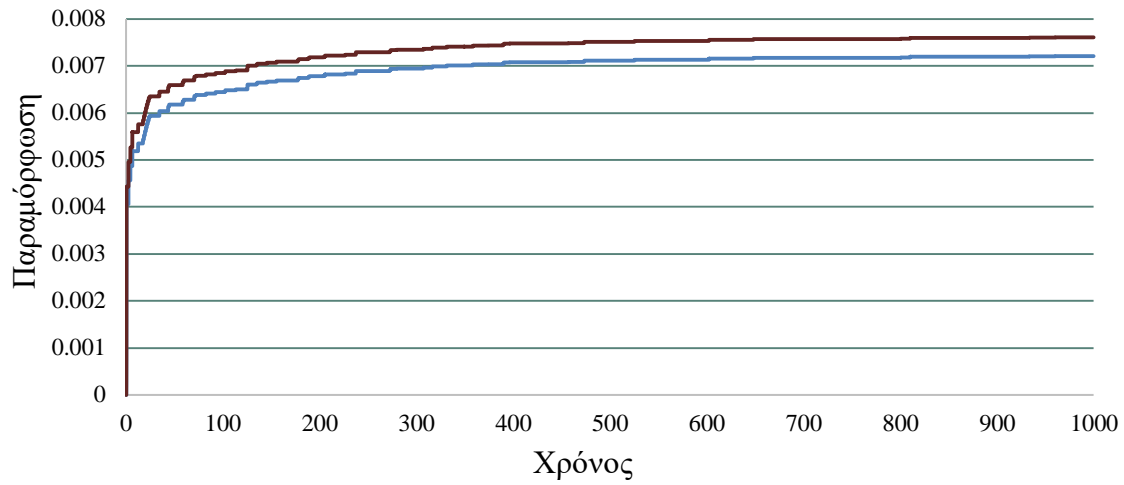
Σχήμα 52. Διάγραμμα μετατοπίσεων για 50 κύκλους

U:U2 N: 2751



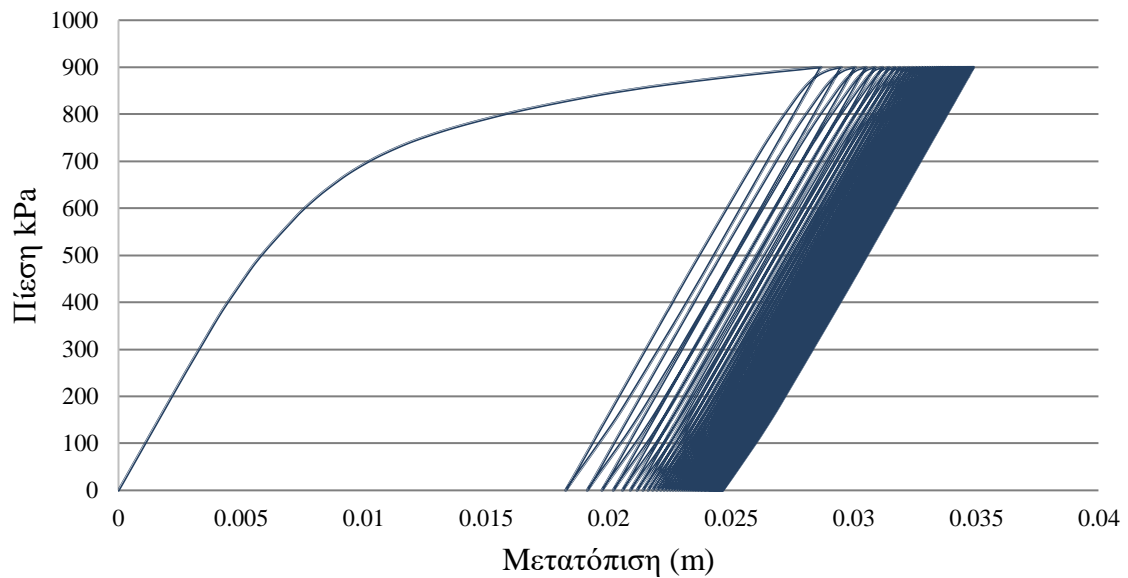
Σχήμα 53. Διάγραμμα μετατόπισης για 1000 κύκλους στα 900 kPa

PREEQ



Σχήμα 54. Πλαστική ισοδύναμη παραμόρφωση στα 900 kPa για 1000 κύκλους

Ανακύκληση για 900

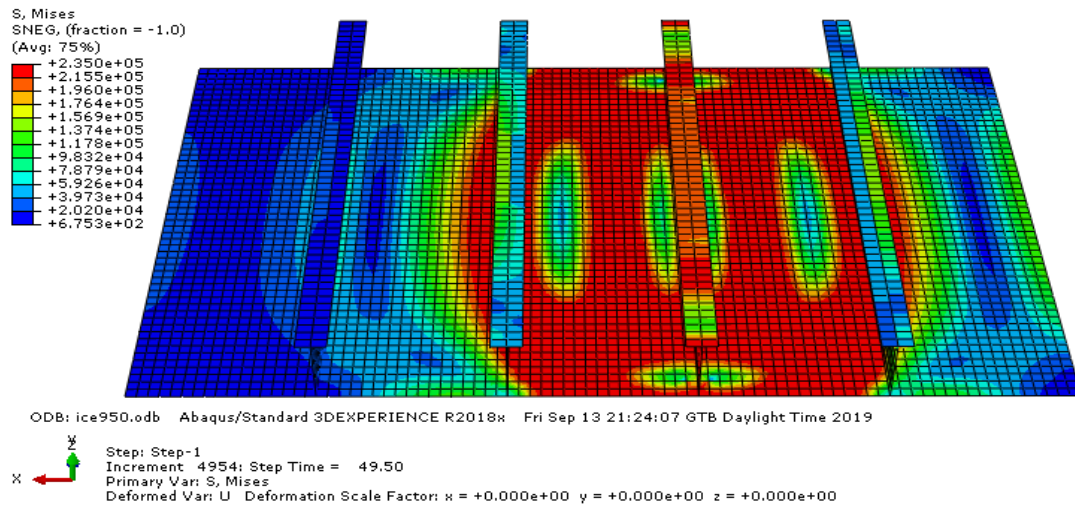


Σχήμα 55. Διάγραμμα πίεσης – μετατόπισης για 900 kPa

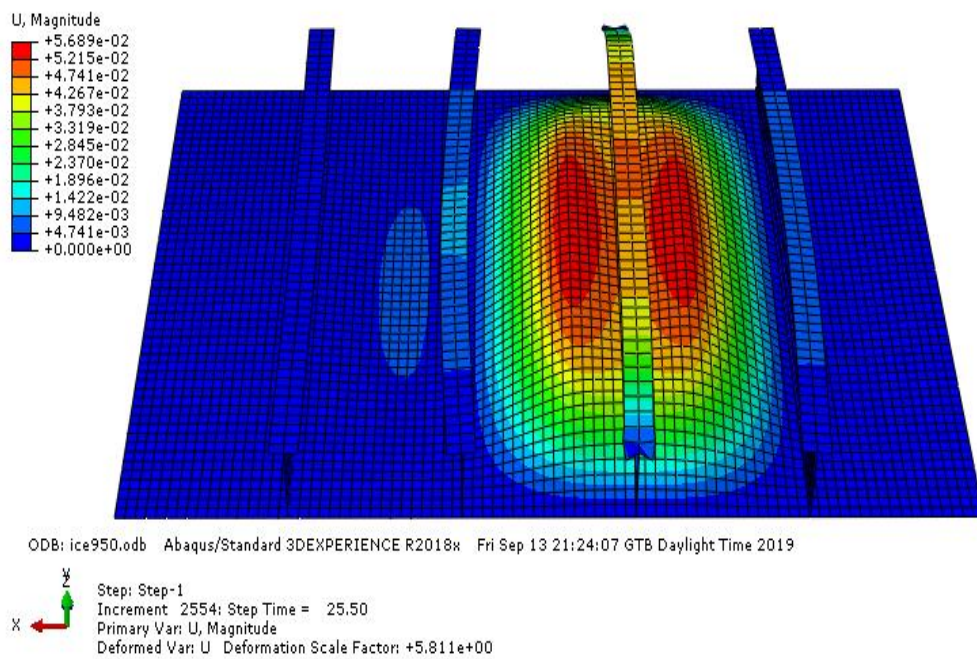
Στην περίπτωση των 900 kPa διαπιστώσαμε πως οι 50 κύκλοι δεν μπορούν να μας δώσουν μια αξιόπιστη εικόνα για την εξέλιξη των μετατοπίσεων. Έτσι αυξήσαμε τους κύκλους σε 1000 και όπως φάνηκε ακόμη και εδώ η απόκριση της κατασκευής δε δείχνει συνεχή άνοδο παραμόρφωσης και μετατόπισης.

4.3.3 Πίεση μεγέθους 950 kPa

Οι τάσεις Von mises στο πέρας και των 50 κύκλων φόρτισης.

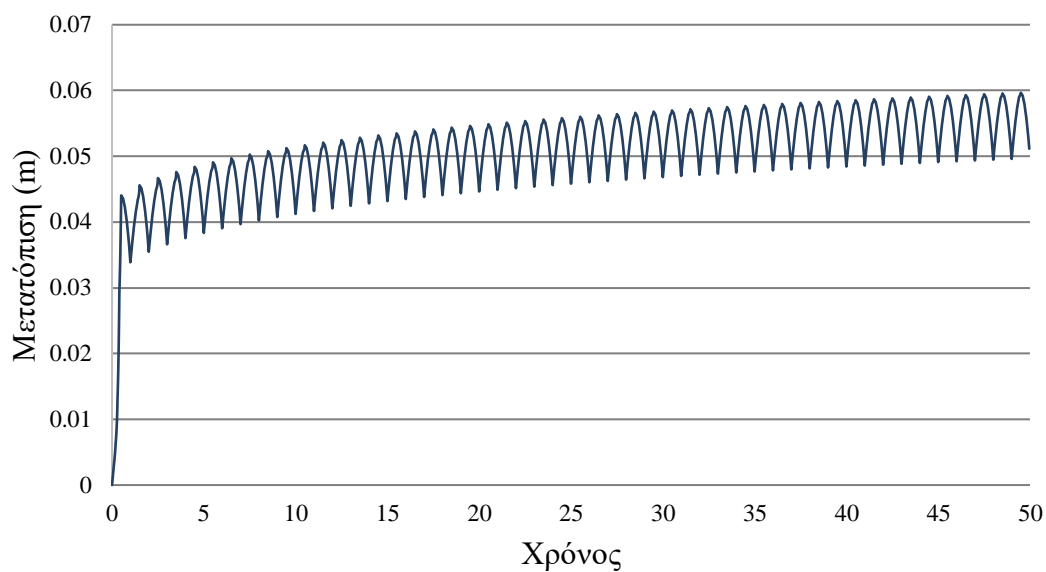


Σχήμα 56. Απεικόνιση τάσεων Von Mises



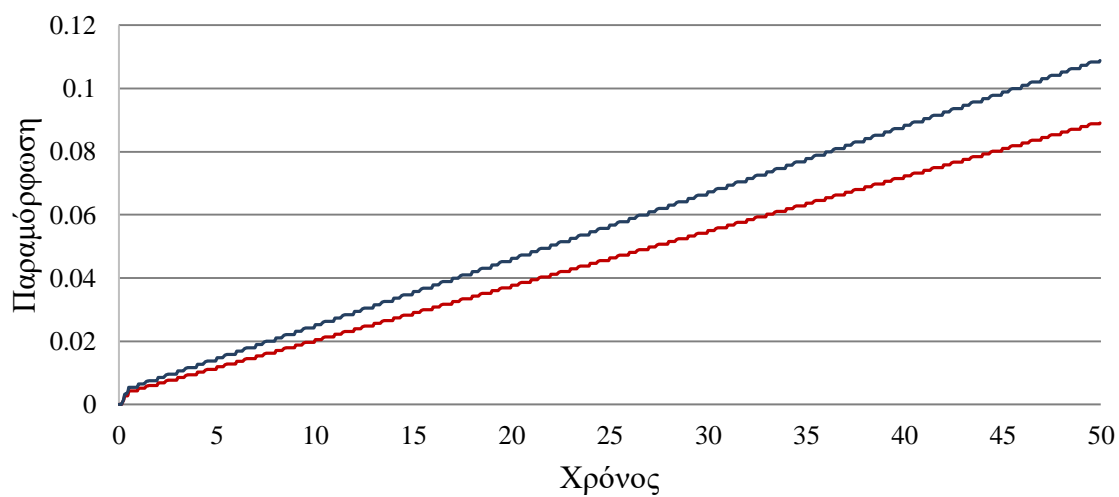
Σχήμα 57. Απεικόνιση μετατοπίσεων

U2 στο μέσο



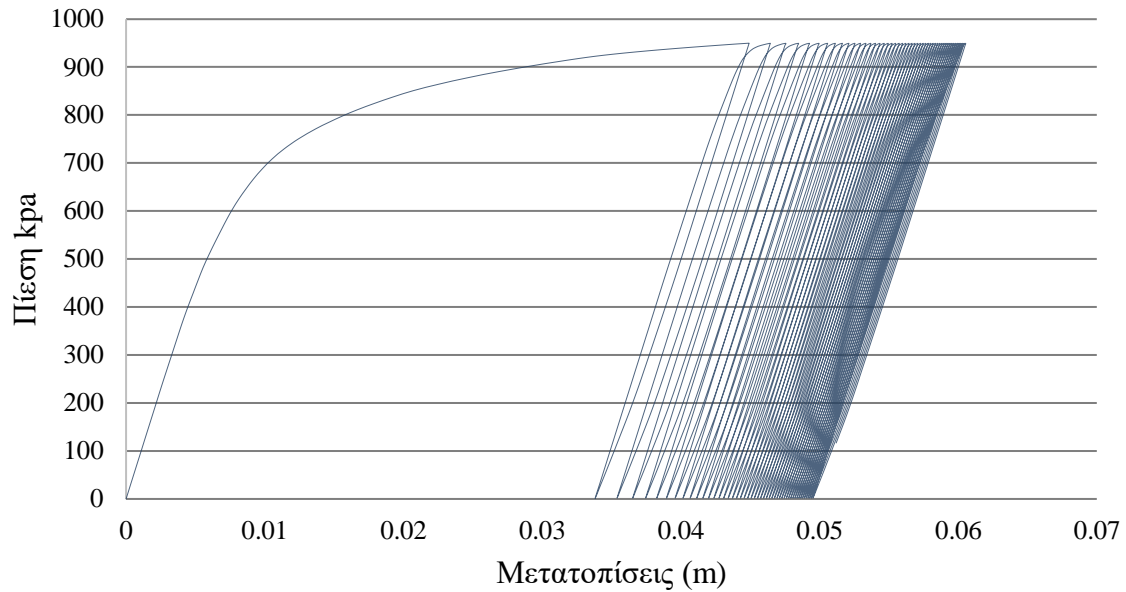
Σχήμα 58. Διάγραμμα μετατόπισης χρόνου για 950 kPa

PEEQ- Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση



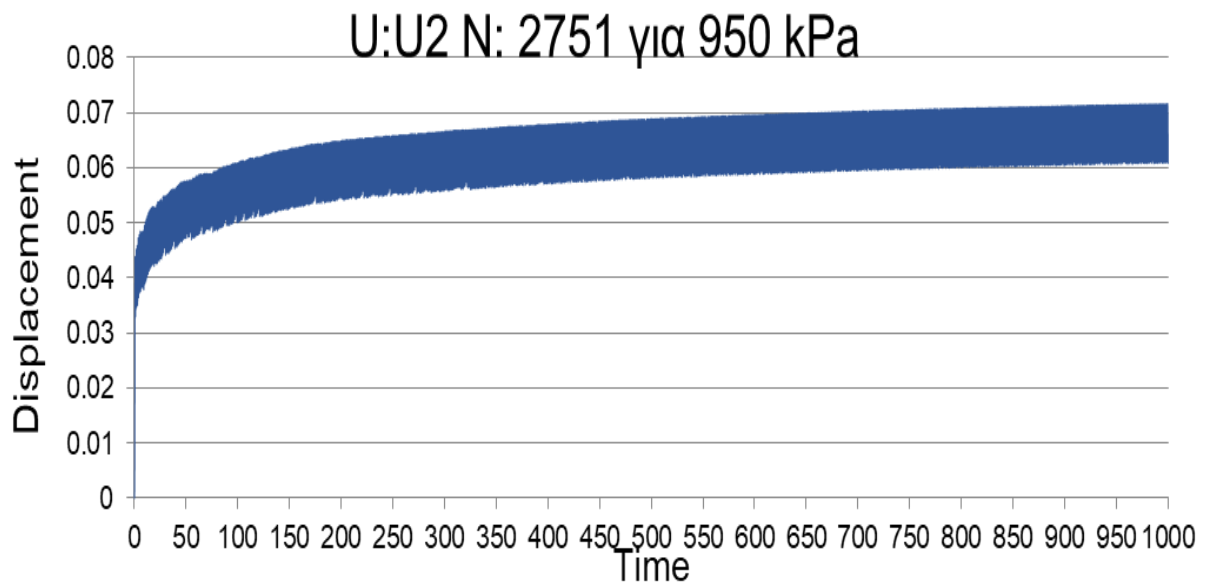
Σχήμα 59. Διάγραμμα ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στη συγκόλληση

Ανακύκληση για 950 kPa



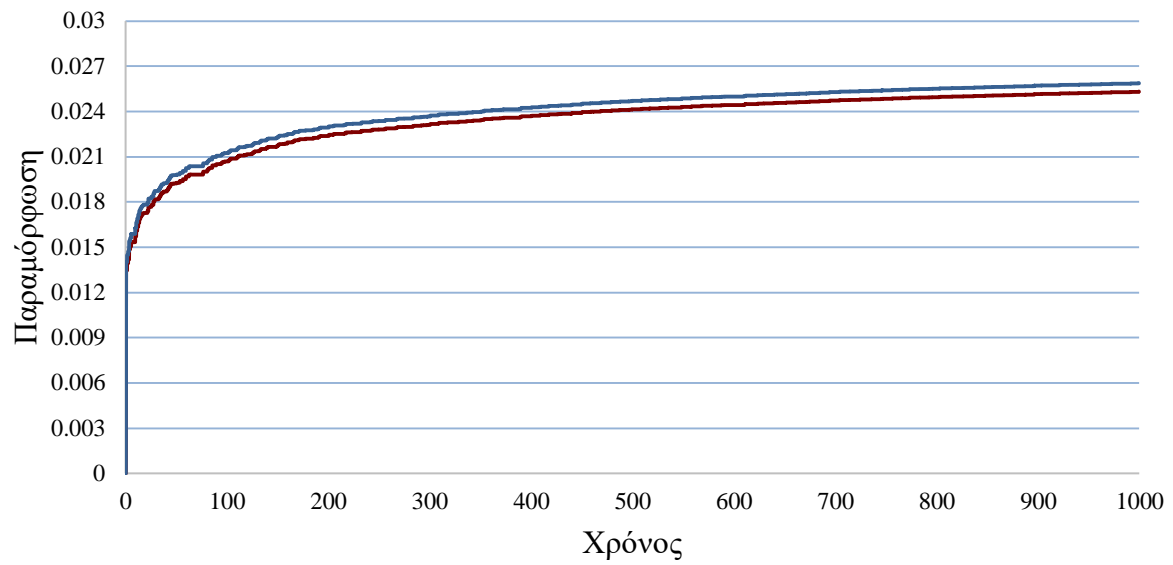
Σχήμα 60. Διάγραμμα πίεσης μετατόπισης

Και στα 950 kPa παρατηρούμε ότι χρειαζόμαστε περισσότερη διερεύνηση. Επομένως αυξάνουμε κι εδώ τους κύκλους.

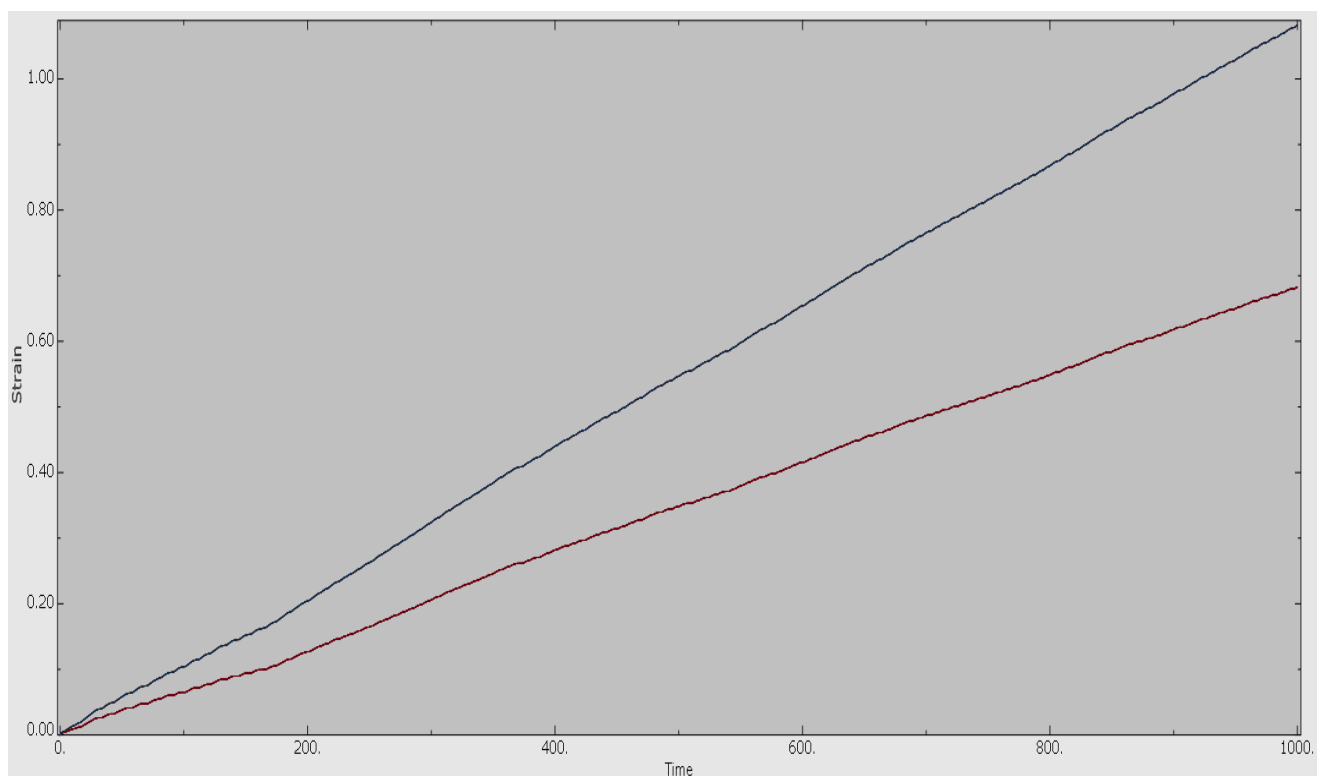


Σχήμα 61. Μετατόπιση υπό φορτίο 950 kPa και 1000 κύκλους

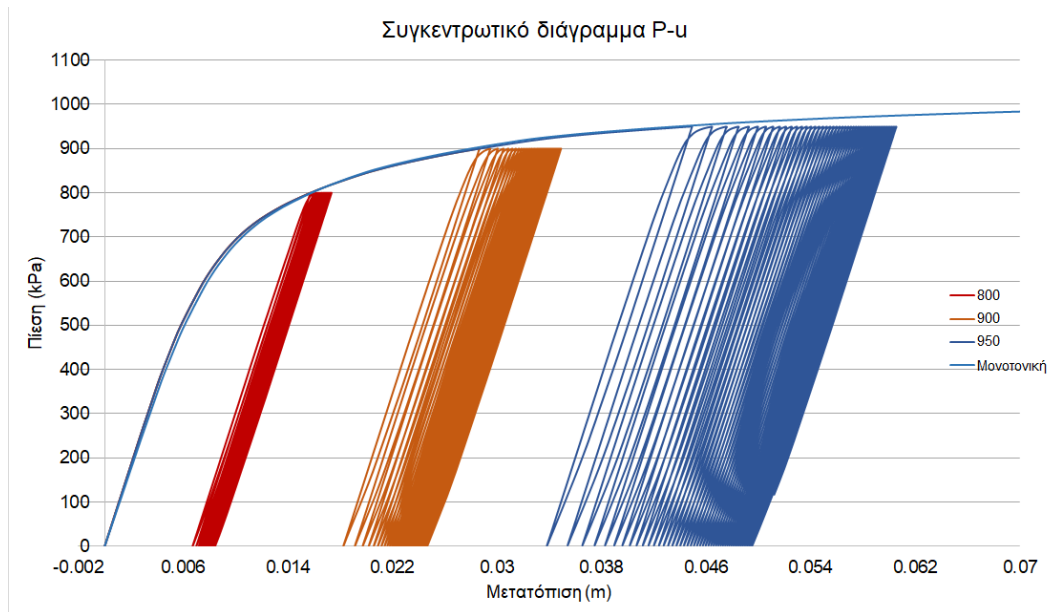
PEEQ



Σχήμα 62. Πλαστική ισοδύναμη παραμόρφωση στο κέντρο



Σχήμα 63. Πλαστική ισοδύναμη παραμόρφωση στη συγκόλληση.



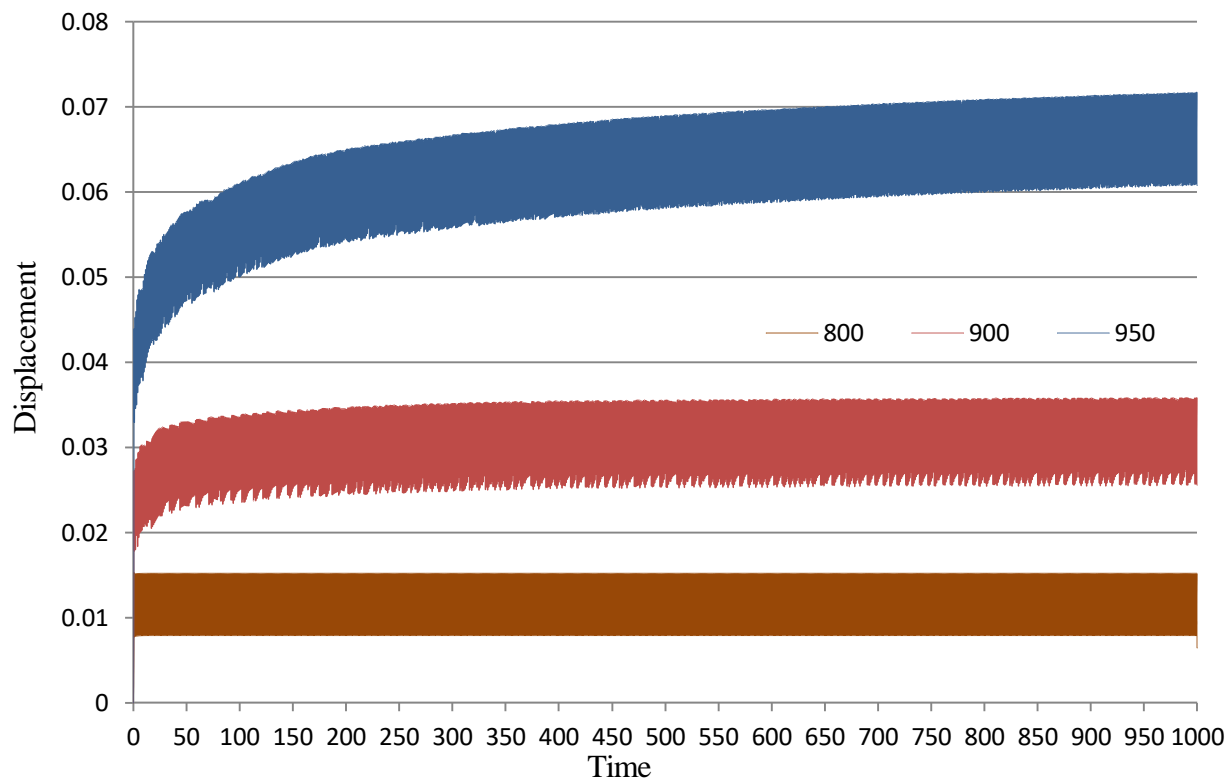
Σχήμα 64. Σύγκριση αποτελεσμάτων P-U για κάθε τιμή φορτίου ανακύκλησης.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάστηκαν οι καμπύλες φορτίου μετατόπισης για όλα τα φορτία που εξετάστηκαν. Οι καμπύλες προέκυψαν από τους 50 κύκλους φόρτισης καθώς απλά θέλαμε να παρουσιάσουμε την απόκριση της κατασκευής συγκριτικά για κάθε φορτίο. Για περισσότερα συμπεράσματα που αφορούν κυρίως τις μετατοπίσεις παρατίθεται στη συνέχεια διάγραμμα και των 1000 κύκλων.

4.3.4 Διαγράμματα μετατοπίσεων και P-U

Και για να γίνει η σύγκριση πιο εμφανής παρουσιάζονται και σε ένα ενιαίο διάγραμμα όπου πλέον είναι ξεκάθαρο για ποια τιμή πίεσης η μετατόπιση δείχνει να μην σταθεροποιείται .

U:U2 PI: PLATE1-1 N: 2751



Σχήμα 65. Συγκεντρωτικές μετατοπίσεις για 1000 κύκλους

Είναι πλέον σαφές ότι για 950 kPa η κατασκευή συμπεριφέρεται με συνεχή αύξηση παραμορφώσεων και μετατοπίσεων. Επίσης και εδώ τα δυο αυτά μεγέθη ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τα όσα προέκυψαν από τα αποτελέσματα μας σημειώνουμε τα εξής:

Στα αποτελέσματα του προγράμματος για τη κάθε κατανομή φορτίου η απόκριση της ανακυκλικής ακολουθεί τη καμπύλη της μονοτονικής φόρτισης.

Στην ανακυκλική φόρτιση του 1^{ου} φορτίου οι οριακές τιμές του φορτίου προσαρμογής ήταν κοντά στο 650 kPa.

Στην περίπτωση του φορτίου πάγου το οριακό φορτίο είναι μεγαλύτερης τάξης. Για 950 kPa αυξάνονται οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις καθώς οι πρώτες στη περιοχή του ελάσματος φτάνουν μετά από 1000 κύκλους το 1, το οποίο σημαίνει 100%.

Άρα συμπερασματικά για το φορτίο του πάγου η κατασκευή κάπου ανάμεσα στο 900-950 kPa θα έχει υποστεί συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων που δεν είναι εφικτό να αναλάβει.

Αυτό επίσης μας δείχνει ότι αν δεν εισάγουμε κάποιο κριτήριο να σταματήσει το πρόγραμμα, είναι ικανό να μας δίνει απόκριση για τεράστια μεγέθη που θα πρέπει να αξιολογηθούν με τη δική μας κρίση.

Επιπρόσθετα, είδαμε πως σε κάποιες περιπτώσεις ο αρχικός αριθμός κύκλων που επιλέγουμε δεν αρκεί για να πάρουμε αξιόπιστα και επαρκή αποτελέσματα.

Επίσης από την εμπειρία του 2^{ου} κεφαλαίου με τη δοκιμή στο απλό έλασμα καταλαβαίνουμε ότι οι αποκρίσεις που προκύπτουν από την ανάλυση του προγράμματος είναι πολύ κοντά στις αναλυτικές σχέσεις (όπου αυτές υπάρχουν).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Παπαδρακάκης, Μ. (1996). «Μαθήματα Στατικής V, Πλαστική Ανάλυση Ραβδωτών Φορέων-Σύγχρονες Μέθοδοι», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Παπαδρακάκης, Μ. (2001). «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Ψαρράς, Λ. (2005). «Χειρισμός Προγραμματιστικά του ABAQUS σε Γραμμικά και μη Γραμμικά Προβλήματα», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Στάνιος, Ε. (2012). «Μελέτη της απόκρισης ενισχυμένων ελασμάτων πυθμένα πλοίου σε δυναμικά φορτία σφυρόκρουσης», Αθήνα

Σταθάς Α. (2018). «Ανάπτυξη υπολογιστικής διαδικασίας για τον ανελαστικό ημίχωρο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση», Αθήνα.

Ξένη βιβλιογραφία

Fukumoto Y. & Kusama H. (1985). “Cyclic Bending Tests Of Thin-Walled Box Beams”, PROC. OF JSCE Structural Eng. /Earthquake Eng. Vol. 2, No. 1, pp.141-151

Padhi G. S. & Sheno R. A. & Moy S.S. J. & Hawkins G. L. (1998). “Progressive failure and ultimate collapse of laminated composite plates in bending”, Composite Structures Vol. 40, No. 3-4, pp. 277-291

Spiliopoulos, K. V. (2000). “Simplified Methods for the Steady State Inelastic Analysis of Cyclically Loaded Structures”. Solid Mechanics and Its Applications, pp.213–232.

Collins, I. F. (2000). “Geomechanical analysis of unbound pavements based on shakedown theory”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 50-59

Paik J. K. & Shin Y. S. (2006). “Structural damage and strength criteria for ship stiffened panels under impact pressure actions arising from sloshing, slamming and green water loading”. Ships and Offshore Structures, 1:3, pp.249-256

Abaqus 6.11 Theory Manual, Dassault Systemes, 2011

Abaqus 6.11, User's manual, Dassault Systemes, 2011

Det Norske Veritas As. (2011). "Rules for Ships", Pt.5 Ch.1 Sec.4, pp. 56-58

Spiliopoulos K.V. & Panagiotou K.D. (2012). "A Direct Method to Predict Cyclic Steady States of Elastoplastic Structures", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 223–224, pp. 186–198

Rohan Gourav Ray. (2015). "Elasto-plastic Analysis of Plate Using ABAQUS", India

Paik J. K. (2018). "Ultimate limit state analysis and design of plated", 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp. 234-235

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Βασικά στοιχεία για τη χρήση του προγράμματος ABAQUS

Το παρόν παράρτημα έχει ως σκοπό τη διευκόλυνση όσων θέλουν να ασχοληθούν μελλοντικά με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS δίνοντας μερικά βασικά στοιχεία για τη χρήση του κυρίως σε σχέση με την ανάλυση μεταλλικών πλακών αλλά και ζητήματα που σχετίζονται με συνολικότερες λειτουργίες του προγράμματος.

1. Δημιουργία αρχείου εισαγωγής

Τα αρχεία δημιουργούνται σε ένα φάκελο ο οποίος έχει επιλεγεί κατά την εγκατάσταση του προγράμματος. Συνήθως ο φάκελος αυτός είναι ο C:\Temp. Η εκτέλεση των αρχείων εισαγωγής αλλά και η δημιουργία όλων των υπόλοιπων αρχείων γίνεται μέσα σε αυτόν τον φάκελο. Τα αρχεία εισαγωγής (input files) δημιουργούνται ως εξής: Δημιουργούμε αρχείο notepad μέσα στο φάκελο Temp και στη συνέχεια το σώζουμε στο είδος αρχείου ως «όλα τα αρχεία», όχι ως txt δηλαδή.

2. Εκτέλεση αρχείου

Το αρχείο εκτελείται ως εξής: Από το φάκελο του προγράμματος ABAQUS ανοίγουμε το ABAQUS command, το οποίο λειτουργεί σε σύστημα DOS. Ανοίγει το λειτουργικό και εμφανίζεται η εντολή που οδηγεί στο φάκελο C:\Temp>

Πληκτρολογούμε

C:\Temp> abaqus job=arxeio.inp (ή χωρίς το .inp)

Εάν το αρχείο υπάρχει στο φάκελο Temp, εκτελείται. Εάν δεν υπάρχει, το πρόγραμμα ζητάει το αρχείο εισαγωγής. Αν δοθεί, τότε δημιουργεί τα υπόλοιπα αρχεία με βάση όχι το όνομα του αρχείου εισαγωγής αλλά με βάση το όνομα που δόθηκε στο
abaqus job

Εάν υπάρχουν ήδη αρχεία από προηγούμενη εκτέλεση του ίδιου αρχείου το πρόγραμμα ζητάει άδεια να συνεχίσει, διαγράφοντας τα παλιά αρχεία.

Δημιουργούνται μια σειρά από αρχεία με τον ίδιο τίτλο αλλά άλλου τύπου το καθένα

Arxeio.dat(αρχείο γραπτών δεδομένων που διαβάζεται)

Arxeio.fil

Arxeio.msg (αρχείο αποθήκευσης των αριθμητικών υπολογισμών των επαναληπτικών διαδικασιών. Σε αυτό εμφανίζονται και τυχόν προβλήματα αδυναμίας σύγκλισης)

Arxeio.odb (αρχείο το οποίο ανοίγει από το ABAQUS CAE και με βάση το οποίο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων)

Arxeio.prt

Arxeio.sta

Και μια εφαρμογή MS-DOS. Σε ορισμένα από αυτά θα αναφερθούμε και παρακάτω.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Εάν διακόψουμε το τρέξιμο Abaqus (απλά κλείνοντας το παράθυρο της Fortran που το καλεί) τότε δημιουργείτε στον ίδιο κατάλογο το αρχείο.lck το οποίο πρέπει οπωσδήποτε να σβήσουμε από τον κατάλογο πριν ανακαλέσουμε το Abaqus γιατί το πρόγραμμα θα βγάζει μονίμως μήνυμα λάθους και θα διακόπτεται η διαδικασία της ανάλυσης εν τη γενέσει της.

3. Κανόνες συγγραφής input file

1. Οι εντολές ξεκινούν με ένα αστέρι
2. Οι γραμμές σχολίων ξεκινούν με 2 ή και περισσότερα αστέρια και δεν επηρεάζουν την εκτέλεση του προγράμματος
3. Σε κάθε γραμμή υπάρχει όριο έως 256 χαρακτήρες
4. Οι δεκαδικοί καταλαμβάνουν έως 20 spaces
5. Οι ακέραιοι μέχρι 10 ψηφία
6. Μετά την εντολή, αν χρειάζεται, ακολουθεί κόμμα, και στη συνέχεια οι υπόλοιπες παράμετροι.
7. Η εισαγωγή μιας εντολής μπορεί να συνεχίζεται και στην επόμενη σειρά, αρκεί στο τέλος της σειράς που αλλάζει να υπάρχει κόμμα. π.χ
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC,DEPENDENCIES=1
Μπορεί να γίνει
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC,
DEPENDENCIES=2
8. Πρέπει οι μονάδες να είναι όλες ίδιες σε όλες τις παραμέτρους εισαγωγής.

4. α) Βασικά στοιχεία αρχείου εισαγωγής (input file)

Παραθέτουμε ένα αρχείο εισαγωγής για να εξηγήσουμε τα βασικά στοιχεία του

*Heading

** Job name: bottom Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2018

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

** PARTS

*Part, name=Plate1

*Node

1, 3.47049999, 0.349999994, 2.670000008

2, 3.40000001, 0.349999994, 2.670000008

3, 3.40000001, 0.349999994, 0

4, 3.47049999, 0.349999994, 0

.....

6588, 3.45000005, 0, 0.0503773578

*Element, type=S4R

1, 1, 2, 37, 140

2, 140, 37, 38, 139

3, 139, 38, 39, 138

.....

6412, 513, 1179, 1180, 514

6413, 514, 1180, 36, 14

*Nset, nset=_PickedSet46, internal

5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 29, 30, 31, 32, 147, 148, 149, 150

151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166
.....6586, 6587, 6588

*Elset, elset=_PickedSet46, internal

425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440
441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456
.....6305, 6306, 6307

*Nset, nset=_PickedSet47, internal

2, 3, 5, 6,

*Elset, elset=_PickedSet47, internal

54, 55, 56, 57,.....

*Nset, nset=_PickedSet48, internal

1, 2, 3, 4,

*Elset, elset=_PickedSet48, internal

1, 2, 3, 4,

** Section: Section-1

*Shell Section, elset=_PickedSet48, material=Steel

0.016, 5

** Section: Section-3

*Shell Section, elset=_PickedSet47, material=Steel

0.012, 5

** Section: Section-2

*Shell Section, elset=_PickedSet46, material=Steel

0.018, 5

*End Part

** MATERIALS

```
*Material, name=Steel

*Elastic

2.07e+08, 0.3

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

*Boundary

Set-7, ENCASTRE

** STEP: Step-1

*Step, name=Step-1, nlgeom=NO, inc=1000

*Static

0.1, 1., 1e-05, 0.1

** LOADS

** Name: Load-1 Type: Pressure

*Dload,

bottom, P, 1000.

** FIELD OUTPUT: F-Output-1

*Output, field

*Node Output

RF, U

*Element Output, directions=YES

EEQUT, LE, P, PE, PEEQ, PEMAG, S, SEQUT, TE, TEEQ, TEVOL

** FIELD OUTPUT: F-Output-2

*Node Output, nset=centre

RF, U

** HISTORY OUTPUT: H-Output-2

*Output, history
```

*Node Output, nset=centre

RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U2

** HISTORY OUTPUT: H-Output-1

*Output, history, variable=PRESELECT

*End StepOUTPUT REQUESTS

*Restart, write, frequency=0

** FIELD OUTPUT: F-Output-1

*Output, field

*Node Output

RF, U

*Element Output, directions=YES

EEQUT, LE, P, PE, PEEQ, PEMAG, S, SEQUT, TE, TEEQ, TEVOL

β) Ανάλυση στοιχείων αρχείου

Ο τίτλος του αρχείου στην αρχή του.

*HEADING

bottom:

Η εντολή *NODE,NSET=..., εισάγει τους κόμβους του μοντέλου. Το NSET (NODE SET) είναι το όνομα του συγκεκριμένου συνόλου κόμβων. Εδώ επειδή έχουμε ένα μοντέλο πλάκας και έχουμε πάρα πολλούς κόμβους δεν παραθέτουμε όλα τα στοιχεία, παρά μόνο ενδεικτικά τις πρώτες και τελευταίες σειρές.

Κάθε κόμβος έχει έναν αριθμό και στη συνέχεια ακολουθούν οι συντεταγμένες στο καθολικό σύστημα (αριθμός κόμβου, συντεταγμένη X, συντεταγμένη Y, συντεταγμένη Z)

*Node

1, 3.47049999, 0.349999994, 2.670000008

```
2, 3.4000001, 0.349999994, 2.67000008  
3, 3.4000001, 0.349999994, 0  
4, 3.47049999, 0.349999994, 0.....
```

Η εντολή *ELEMENT εισάγει τα στοιχεία του μοντέλου, δηλαδή το είδος των ράβδων, συνδέσεων, κελυφών κλπ που ενώνουν δύο κόμβους. Το ABAQUS διαθέτει μια σειρά από στοιχεία τα οποία μπορεί κανείς να βρει στη βιβλιοθήκη στοιχείων (Element Library) του documentation του ABAQUS, μαζί με τις ιδιότητές τους και τις απαραίτητες παραμέτρους εισαγωγής που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους. Μετά την εντολή ακολουθεί ο τύπος του στοιχείου και στη συνέχεια το όνομα του Element set (ELSET) δηλαδή του συνόλου των στοιχείων που ομαδοποιούνται. Σε κάθε ομάδα στοιχείων τοποθετούμε όμοια στοιχεία γιατί θα τους προσδώσουμε ίδιες μηχανικές ιδιότητες.

Στις επόμενες γραμμές ορίζονται τα στοιχεία (elements). Πρώτα ο αριθμός του στοιχείου και στη συνέχεια οι κόμβοι που ενώνει, οι οποίοι εδώ είναι 4. Σε αυτό το παράδειγμα έχουμε επιλέξει 3 σύνολα στοιχείων.

```
*Element, type=S4R  
1, 1, 2, 37,  
**Elset, elset=_PickedSet47,  
2, 3, 5,.....
```

Στην δική μας περίπτωση δεν χρειάστηκε να επιλέξουμε είδος διατομής καθώς ο φορέας σχεδιάστηκε για τη διατομή του τη κατά x και μετά κάναμε **extrude**, δηλαδή το προεκτείναμε για το πλάτος που θέλαμε (=2.67 m). Έπειτα για κάθε ομάδα στοιχείων εισάγαμε απλά διαφορετικό πάχος. Δηλαδή εμείς δημιουργήσαμε 3 γιατί θέλαμε διαφορετικό πάχος στο έλασμα, στο κορμό του ενισχυτικού και στη φλάτζα.

Εισάγουμε λοιπόν το όνομα του Elset στο οποίο αναφέρεται η εισαγωγή, δηλαδή οι συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες.

Οι προηγούμενες παράμετροι είναι για την ελαστική ανάλυση. Παρακάτω θα παρουσιαστεί και η πλαστική ανάλυση.

Εδώ εισάγεται και ο δεύτερος κλάδος, της πλαστικής δλδ. περιοχής.

όπου με τάση διαρροής $f_y = 235 \text{ MPa}$ έχουμε:

**

** MATERIALS

**

*Material, name=Steel

*Elastic

2.07e+08, 0.3

*Plastic

235000., 0.

235000., 0.2

Η εντολή *Boundary ορίζει τους περιορισμούς στην κίνηση των διαφόρων άκρων (κόμβων) των στοιχείων. Ειδικότερα, μπορεί να περιορίζονται και οι 6 βαθμοί ελευθερίας κίνησης ενός κόμβου, δηλ. $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$,

πράγμα που συνέβη και στη δική μας περίπτωση. Και το τμήμα S7 που αναφέρεται είναι το αυτό που επιλέξαμε να αποτελεί όλες τις πλευρές του ελάσματος και τις ακραίες διατομές των ενισχυτικών.

*Boundary

Set-7, ENCASTRE

Η εντολή *STEP αναφέρεται στη διαδικασία εύρεσης λύσης στο πρόβλημα και ακολουθεί συνήθως τις εντολές δημιουργίας του μοντέλου. Εδώ ορίζονται τα φορτία αλλά και η ανάλυση που χρησιμοποιείται. Εμείς χρησιμοποιούμε στατική ανάλυση, σε κάποιες εκδοχές της.

Η εντολή *STEP μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνη της. Μια παράμετρος που αλλάζει συχνά είναι το INC, δηλαδή ο αριθμός των αυξήσεων (increments) που εκτελεί το πρόγραμμα πριν σταματήσει. Εάν δε δοθεί άλλη εντολή, το πρόγραμμα εκτελεί 100 increments. Το πρόγραμμα μπορεί να σταματήσει και πριν την ολοκλήρωση των increments που δίνονται, εάν φτάσει κάποιο άλλο όριο που δίνεται ή αν καταρρεύσει ο φορέας ή εάν δεν μπορεί να συγκλίνει η επαναληπτική διαδικασία. Αυτό επισημαίνεται με error message στο αρχείο DAT, και το οποίο εξηγείται στο αρχείο MSG στο οποίο φαίνονται οι υπολογισμοί των επαναληπτικών διαδικασιών.

*Η εντολή STATIC αναφέρεται στη στατική ανάλυση. Οι παράμετροι της επόμενης σειράς έχουν τον εξής τρόπο εισαγωγής. Υπάρχει η πιθανότητα να εμφανίζεται αδυναμία σύγκλισης λόγω των παραμέτρων εκτέλεσης της μεθόδου στο αρχείο msg. Εάν αυτό συμβεί αλλάζουμε τις παραμέτρους.

1. αρχική χρονική αύξηση, αν δεν δοθεί ορίζεται αυτόματα
2. Συνολική χρονική περίοδος του βήματος, η αυθαίρετη είναι 1.0
3. Ελάχιστη επιτρεπτή χρονική αύξηση. Αν δεν δοθεί, χρησιμοποιείται τιμή 10^{-5} της συνολικής χρονικής περιόδου
1. Μέγιστη επιτρεπτή χρονική αύξηση. Αν δεν δοθεί δεν ορίζεται μέγιστη.

*Static

0.01, 1., 1e-05, 0.01, ,

Στη συνέχεια ορίζονται οι φορτίσεις. Η επίλογή μας αφορά Type: Pressure δηλαδή φορτία πίεσης. Η επόμενη σειρά έχει ως εξής: επιφάνεια επιβολής, διεύθυνση επιβολής, μέγεθος. ΠΡΟΣΟΧΗ: Η κατεύθυνση δίνεται με βάση το πρόσημο του μεγέθους του φορτίου.

Στις επόμενες σειρές ορίζονται οι παράμετροι με βάση τις οποίες το πρόγραμμα εκδίδει αποτελέσματα στα δημιουργούμενα αρχεία κατά την εκτέλεση. Η εντολή OUTPUT αναφέρεται στο αρχείο ODB, με βάση το οποίο δουλεύει το ABAQUS CAE. Η δεύτερη παράμετρος μπορεί να είναι FIELD ή HISTORY και η τρίτη ορίζει τις μεταβλητές και τα μεγέθη που θέλουμε να εμφανίζονται στην παρουσίαση και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων από το ABAQUS CAE.

Οι επόμενες σειρές αναφέρονται στα εντατικά μεγέθη των κόμβων και των στοιχείων που θέλουμε να υπολογίζονται κατά την εκτέλεση του αρχείου. Αυτά καταγράφονται και σε αρχεία που κρατάει το πρόγραμμα για να λειτουργεί αλλά εκτυπώνονται και στο αρχείο dat το οποίο είναι προς ανάγνωση. Μετά τις εντολές *NODE PRINT, *EL PRINT εισάγονται οι ζητούμενες μεταβλητές. Εδώ ζητάμε:

- A) Μετατοπίσεις (U2) και αντιδράσεις στήριξης (RF, RM) για τους κόμβους (όλους εφόσον δεν αναφέρεται κάτι άλλο, αν και θα έχουμε αποτελέσματα μόνο στους ακραίους κόμβους)
- B) τις τάσεις Von Mises (S) τις πλαστικές ισοδύναμες παραμορφώσεις (PEEQ)

Μετά τις εντολές PRINT εισάγονται οι εντολές FILE στις οποίες αναφέρονται τα ίδια με τις εντολές PRINT αλλά και η συχνότητα για την οποία θέλουμε να παίρνουμε αυτά τα δεδομένα.

Η εντολή αυτή τερματίζει το βήμα. Μπορεί να ακολουθεί επόμενο βήμα το οποίο θα ξεκινάει πάλι προφανώς με την εντολή *STEP.

***END STEP**

γ) Άλλες εντολές στα αρχεία εισαγωγής

- Οι εντολές ***RESTART,WRITE** και ***RESTART,READ**.

Η πρώτη χρησιμοποιείται στο πρώτο αρχείο έναρξης. Η δεύτερη για να αρχίσει η εκτέλεση ενός αρχείου με δεδομένο ένα προηγούμενο. Όταν εκτελούμε στο ABAQUS COMMAND αρχείο που ξεκινάει με *RESTART,READ μας ζητείται το προηγούμενο αρχείο, το οποίο πρέπει να έχει ήδη εκτελεστεί. Ανάλογα με τις εντολές που θα δώσουμε, το πρόγραμμα μπορεί να συνεχίζει από εκεί που σταμάτησε με δεδομένα φορτία ή παραμορφώσεις κλπ. Οι εντολές αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για αναλύσεις που δεν μπορούν να ακολουθηθούν από άλλα STEPs όπως η ανάλυση RIKS, στην οποία θα αναφερθούμε ακολούθως.

- Η εντολή ***STATIC,RIKS** η οποία μπαίνει στη θέση της ***STATIC** και αναφέρεται στη μέθοδο RIKS η οποία αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Ένα βήμα RIKS δεν μπορεί να ακολουθηθεί από άλλο βήμα στο ίδιο αρχείο.

Επίσης, στην εντολή για τα φορτία που ακολουθεί βάζουμε το φορτίο στόχο. Αν δηλαδή

έχουμε από προηγούμενη επιβολή φορτίο 1000 και θέλουμε να φτάσουμε στο 0, δε θα βάλουμε -1000, αλλά 0

Πχ.

*STATIC,RIKS 0.001, 1., 1e-05, 1.

➤ Για την **πλαστική ανάλυση**. Για τον υπολογισμό των πλαστικών αντοχών των διατομών στο ABAQUS με τις εντολές *PLASTIC AXIAL, *PLASTIC M1, αλλά στη δικής μας περίπτωση της πλάκας ο έλεγχος αυτός της πλαστικοποίησης γίνεται μέσω της πλαστικής τάσης.

➤ Η εντολή ***NLGEOM (Non Linear GEOMetry)** που εντέλει το πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει μη γραμμική γεωμετρία, δηλαδή ανάλυση 2ας τάξης. Στην περίπτωση μας αυτό το φαινόμενο αμελήθηκε και δεν θεωρήσαμε μεγάλες μετατοπίσεις, έτσι

*Nlgeom=OFF

- Η εντολή ***AMPLITUDE** η οποία αφορά στην αυξομείωση μεγεθών με το χρόνο κατά μήκος ενός βήματος. Εδώ λοιπόν ξεκινά η ανακύκλιση του φορτίου. έχουμε μια προσέγγιση απλοποιητική ως στατική φόρτιση γι' αυτό εισάγουμε τις επαναλήψεις του φορτίου με αυτή την επιλογή.

Ουσιαστικά πρόκειται για συνάρτηση με το χρόνο από την οποία μπορεί να εξαρτάται ένα φορτίο αλλά και μετατόπιση. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας για ένα κύκλο φόρτισης και αυτό θα εισαχθεί όσες φορές όσοι και οι κύκλοι που επιλέγουμε να τρέξουμε την ανάλυση.

Πχ.

AMPLITUDE,NAME=AMP1,TIME=STEP TIME, DEFINITION=TABULAR

0.,	0.,
0.1,	0.31200364,
0.2,	0.59200784,
0.3,	0.81201264,
0.4,	0.95201824,
0.5,	1.000025,

0.6, 0.95203344,
0.7, 0.81204424,
0.8, 0.59205824,
0.9, 0.31207644,
1, 0.,

*Static

0.01, 50., 1e-05, 0.01

**

** LOADS

**

** Name: Load-1 Type: Pressure

*Dsload, amplitude=Amp-1

bottom_cyclic, P, 650.

Σε κάθε γραμμή η πρώτη τιμή είναι ο χρόνος και η δεύτερη το μέγεθος της συνάρτησης.

Την εντολή ακολουθούν ορισμένες παράμετροι μερικές από τις οποίες θα εξηγηθούν εδώ.

NAME, για την παρακάτω αναφορά στην εντολή, TIME για την αναφορά του χρόνου, DEFINITION για τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων. Εδώ είναι TABULAR, υπάρχει EQUALLY SPACED και όπου θεωρείται σταθερό χρονικό διάστημα και δίνονται μόνο οι τιμές της συνάρτησης, αλλά και άλλες.

5. Χρήση Documentation του ABAQUS.

Στο φάκελο του προγράμματος του ABAQUS βρίσκεται και το Documentation που λειτουργεί σε περιβάλλον web explorer (Internet explorer, Mozilla Firefox κλπ), ως μηχανή εύρεσης, με διαφορετικά κεφάλαια. Βάζοντας τη λέξη ή τη φράση που αναζητούμε, εμφανίζεται δίπλα σε κάθε κεφάλαιο ή υποκεφάλαιο ο αριθμός των εμφανίσεών της, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Τα βασικά κεφάλαια είναι τα εξής:

Modeling and Visualization

[Abaqus/CAE User's Manual](#) Εξηγεί τον τρόπο λειτουργίας του περιβάλλοντος του ABAQUS CAE, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων)

Analysis

[Abaqus Analysis User's Manual](#) Είναι το κεφάλαιο της ανάλυσης του ABAQUS και το βασικότερο κεφάλαιο που συνδέει και τα υπόλοιπα, ειδικά κατά τη συγγραφή αρχείων εισαγωγής

Examples

[Abaqus Example Problems Manual](#) Κεφάλαιο παραδειγμάτων Reference

[Abaqus Keywords Reference Manual](#) Το κεφάλαιο που παρουσιάζει τους κανόνες εισαγωγής όλων των εντολών και των παραμέτρων τους για τα αρχεία εισαγωγής.

[Abaqus Theory Manual](#) Κεφάλαιο παρουσίασης της θεωρίας στην οποία βασίζονται οι αναλύσεις και οι επαναληπτικές μέθοδοι του ABAQUS

6. Χρήση ABAQUS CAE

Για να ξεκινήσουμε ανοίγουμε το ABAQUS CAE από το φάκελο προγραμμάτων του ABAQUS. Στις αρχικές επιλογές επιλέγουμε Open Database και στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε για “file filter” output database

The screenshot shows the ABAQUS 6.14 Documentation website. The header features the SIMULIA logo and 'Abaqus 6.14' on the left, a vertical 'DOCUMENTATION' bar in the center, and a search bar with buttons for 'Search All Guides', 'Clear Search', 'Advanced Search', and 'Search Tips' on the right. The main content area is divided into two columns. The left column lists categories: Modeling and Visualization (with 11 guides), Analysis (with 43 guides), Examples (with 1 and 10 guides), Tutorials (with two links), Information (with one link), and Installation and Licensing (with one guide). The right column lists: Reference (with 7, 39, and 1 guides, plus a glossary), Programming (with 10 guides), Interface (with one guide), and Abaqus 6.14 Update Information (with one release note).

Modeling and Visualization
11 [Abaqus/CAE User's Guide](#)

Analysis
43 [Abaqus Analysis User's Guide](#)

Examples
1 [Abaqus Example Problems Guide](#)
10 [Abaqus Benchmarks Guide](#)

Tutorials
[Getting Started with Abaqus: Interactive Edition](#)
[Getting Started with Abaqus: Keywords Edition](#)

Information
[Using Abaqus Online Documentation](#)

Installation and Licensing
[Abaqus Installation and Licensing Guide](#)

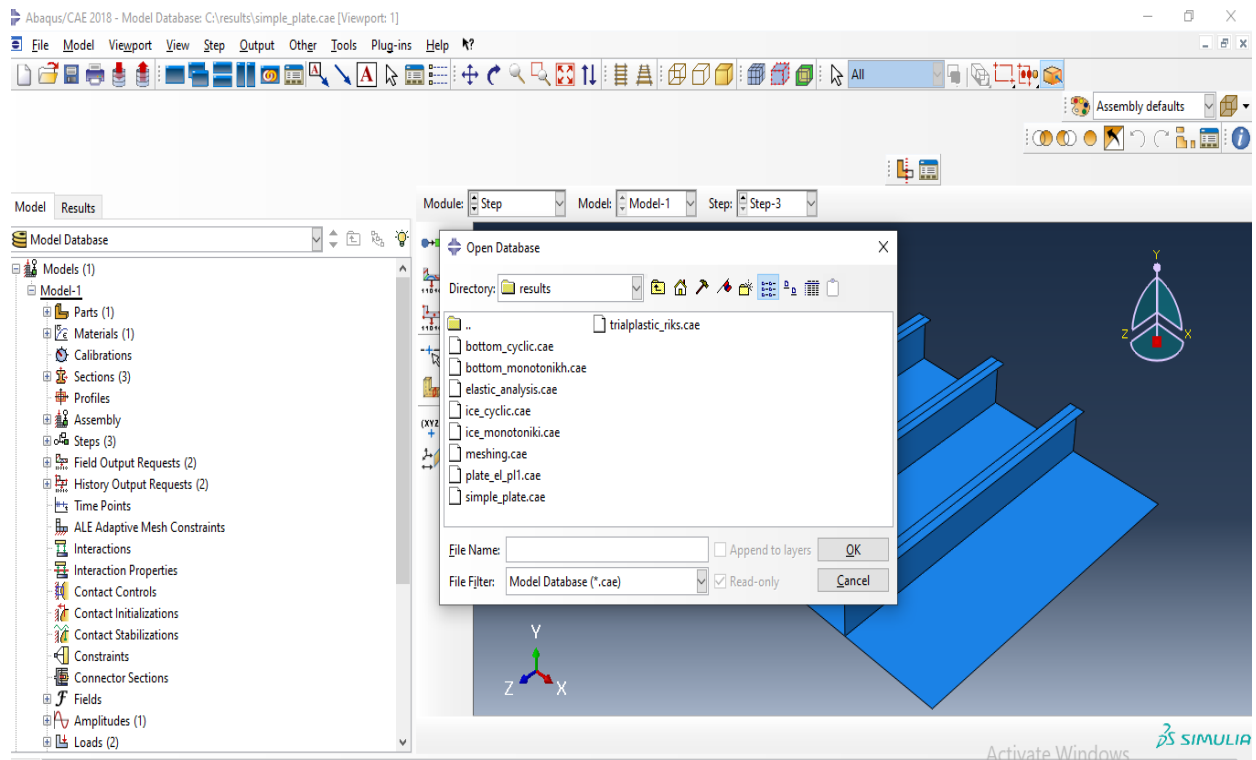
Reference
7 [Abaqus Keywords Reference Guide](#)
39 [Abaqus Theory Guide](#)
[Abaqus Verification Guide](#)
1 [Abaqus User Subroutines Reference Guide](#)
[Abaqus Glossary](#)

Programming
[Abaqus Scripting User's Guide](#)
10 [Abaqus Scripting Reference Guide](#)
[Abaqus GUI Toolkit User's Guide](#)
[Abaqus GUI Toolkit Reference Guide](#)

Interface
[Abaqus Interface for Moldflow User's Guide](#)

Abaqus 6.14 Update Information
[Abaqus Release Notes](#)

Παράθυρο Documentation ABAQUS



Μερικά βασικά στοιχεία για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων :

Παράθυρα περιβάλλοντος ABAQUS CAE

α) Η οθόνη του προγράμματος αντιγράφεται στη ζωγραφική με CTRL+C,
CTRL+V

β) Στοιχεία εμφάνισης

- View→Graphics Options→Viewport background ορίζουμε το φόντο της επιφάνειας εργασίας

(solid και άσπρο για λευκό φόντο)

- View→ODB display options→Entity Display επιλέγουμε εμφάνιση οριακών συνθηκών και άλλων στοιχείων του μοντέλου

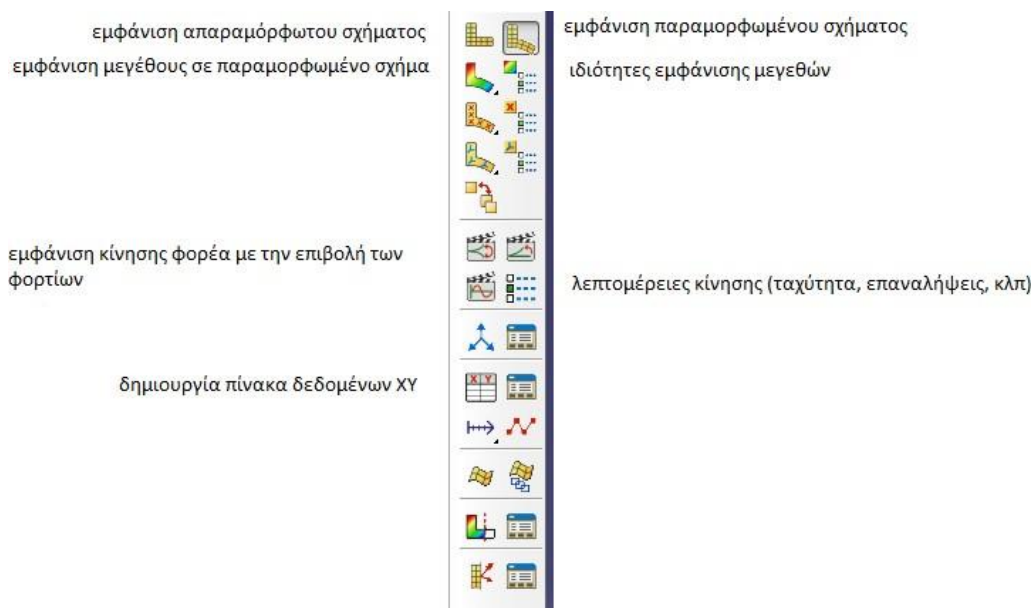
- Options→Labels επιλέγουμε εμφάνιση κόμβων και στοιχείων (γραμματοσειρά, μέγεθος και χρώμα)

- Options→Symbol ορίζουμε την εμφάνιση συμβόλων

γ) Από το Result της γραμμής ενεργειών, μπορούμε να επιλέξουμε το STEP για το οποίο θέλουμε να πάρουμε αποτελέσματα.

Από τα από κάτω παραθυράκια επιλέγουμε το μέγεθος που θέλουμε να εμφανίζεται και ποιες συνιστώσες του (αναφέρονται στην εμφάνιση δεδομένων σε παραμορφωμένο σχήμα)

Από την κατακόρυφη γραμμή εργαλείων μπορούμε να επιλέξουμε μια σειρά ενεργειών που αναλύονται στην παρακάτω εικόνα.



Στήλη εργαλείων ABAQUS CAE

δ) Για τα διαγράμματα πίεσης μετατόπισης

Αφού επιλέξουμε P από τα παράθυρα καθορισμού μεγεθών της γραμμής ενεργειών, επιλέγουμε από τις contour options (ιδιότητες εμφάνισης μεγεθών):

Basic→ Contour type →Line και show tick marks for line elements

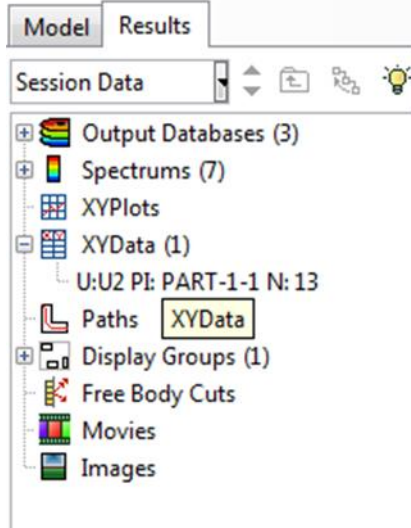
Color & Style→Spectrum καθορίζουμε το φάσμα. Συμφέρει white to black

Limits: καθορίζουμε τα όρια και επιλέγουμε εμφάνιση μέγιστου και ελάχιστου (Show location). Δεν υπάρχει δυνατότητα εμφάνισης όλων των τιμών που έχει υπολογίσει το πρόγραμμα. Αυτές μπορούμε να τις πάρουμε από τα δεδομένα XY.

Για να μην είναι παραμορφωμένος ο φορέας, από τη γραμμή ενεργειών, Options→ Common→ Deformation Scale Factor→ Uniform και βάζουμε τιμή 0. Εμείς τις περισσότερες φορές για να είναι εμφανή η παραμόρφωση μας αυξάνουμε καπου στα 5 το scale factor. Για την απεικόνιση του πραγματικού μεγέθους της αναλογίας της παραμόρφωσης το βάζουμε 1.

Παρατήρηση: Για τη σωστότερη απόδοση των μεγεθών, χρειαζόμαστε περισσότερους κόμβους, ώστε το πρόγραμμα να έχει περισσότερες τιμές για τη σχεδίαση του διαγράμματος.

Για τη δημιουργία διαγραμμάτων XY : Επιλέγουμε τη δημιουργία πίνακα XY Create XY Data→ ODB field output.

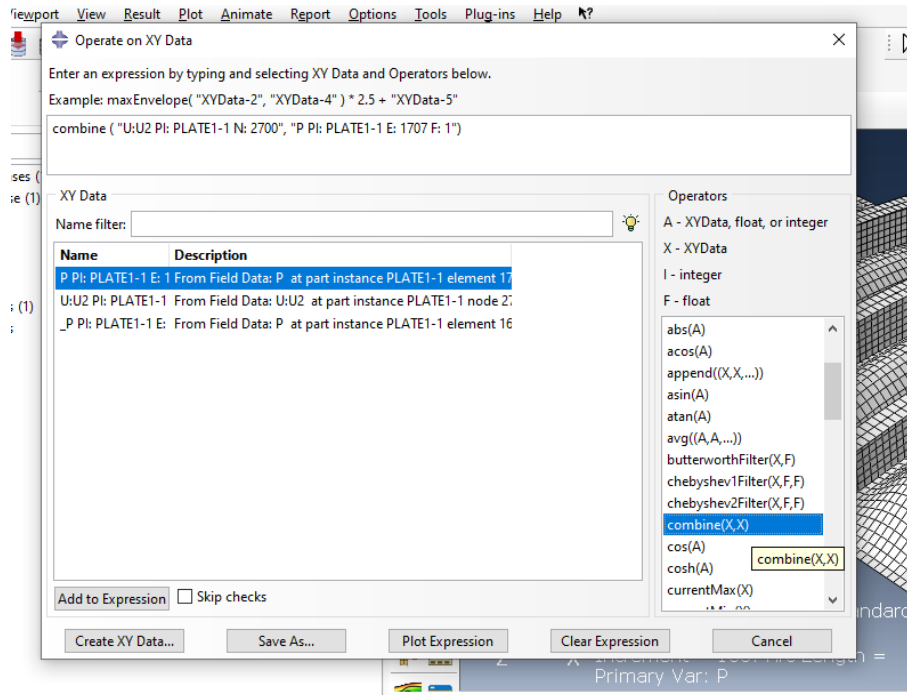


Στη συνέχεια στο παράθυρο Variables επιλέγουμε τις μεταβλητές, δηλαδή ζητούμενα μεγέθη στα σημεία που θέλουμε από το Position. Στην ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα Unique nodal, για τα μεγέθη της μετατόπισης τα οποία δίνουν τη τιμή του μεγέθους σε ζητούμενο κόμβο, και τα Element Face, για την πίεση.

Στο παράθυρο Elements/Nodes επιλέγουμε τα σημεία στα οποία ζητάμε τα μεγέθη. Συνεχίζουμε με Save ή Plot.

Ο πίνακας XY εμφανίζεται στο αριστερό μέρος του παράθυρου στα XY Data, με πρώτο στοιχείο στο όνομα το μέγεθος (εδώ U2, μετατόπιση κατά τη διεύθυνση 2) και τελευταίο το σημείο στο σημείο στο οποίο δίνεται (εδώ N:2749, κόμβος 2749).

Για τον συνδυασμό του δυο μεγεθών σε μία ενιαία καμπύλη πηγαίνουμε στο Operate XY data επιλέγουμε τα δύο μεγέθη που αποθηκεύσαμε και κάνουμε combine.



Για το διάγραμμα της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. επιλέγουμε Integration Point που δίνουν τιμές για τα δύο ακραία σημεία ολοκλήρωσης του ζητούμενου στοιχείου (SP1, SP5).

Επειδή το μέγεθος X είναι πάντα το μήκος τόξου της επαναληπτικής μεθόδου, αλλά και για λόγους καλύτερης επεξεργασίας, μπορούμε να μεταφέρουμε τα δεδομένα ως εξής:

Δεξί κλικ στον πίνακα XY που μας ενδιαφέρει edit → επιλογή στήλης Y (με αριστερό κλικ στο Y) → Ctrl+C → Ctrl+V στο Excel ή άλλο πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων.